

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**СТЕРЛИТАМАКСКИЙ ФИЛИАЛ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БАШКИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ НАУКИ
И ОБРАЗОВАНИЯ
В СОВРЕМЕННОМ ВУЗЕ**

**Сборник трудов
V Международной научно-практической конференции
Республика Башкортостан, г. Стерлитамак
16–18 сентября 2021 г.**

Стерлитамак 2021

УДК 001:5:378

ISBN 978-5-86111-741-8

ББК 72.5

А 43

Рецензенты

кафедра общей и теоретической физики (Стерлитамакский филиал БашГУ); кафедра физико-математического образования (Нижевартковский государственный университет, ХМАО, г. Нижневартовск); доктор технических наук, профессор Е.А. Муравьева (филиал УГНТУ в г. Стерлитамаке)

Ответственный редактор – доктор технических наук, профессор А.Л. Галиев (Стерлитамакский филиал БашГУ)

Редакционная коллегия:

д-р физ.-мат. наук Н.Н. Биккулова; д-р техн. наук, профессор А.И. Филиппов; д-р физ.-мат. наук, профессор О.В. Ахметова; канд. техн. наук, доцент А.В. Орлов; канд. физ.-мат. наук, доцент М.А. Зеленова (Стерлитамакский филиал БашГУ)

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ НАУКИ И ОБРАЗОВАНИЯ В СОВРЕМЕННОМ ВУЗЕ: сборник

А 43 трудов V Междунар. науч.-практ. конф., Республика Башкортостан, г. Стерлитамак, 16–18 сентября 2021 г. / Отв. ред. А.Л. Галиев. – Стерлитамак: Стерлитамакский филиал БашГУ, 2021. – 530 с. – ISBN 978-5-86111-741-8

В сборнике публикуются труды участников, тезисы докладов V Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы науки и образования в современном ВУЗе», состоявшейся 16–18 сентября 2021 г. в Стерлитамакском филиале БашГУ. Представленные материалы характеризуют современное состояние и актуальные проблемы науки и образования в современном ВУЗе.

Сборник адресован преподавателям, аспирантам и студентам, обучающимся на технических, естественнонаучных, физико-математических и гуманитарных факультетах.

ISBN 978-5-86111-741-8

© Коллектив авторов, 2021

© Стерлитамакский филиал БашГУ, 2021

ОРГКОМИТЕТ

Сыров И.А., директор СФ БашГУ, д.филол.н, профессор – председатель (Стерлитамак);

Филиппов А.И., профессор СФ БашГУ, д.т.н. – сопредседатель (Стерлитамак);

Самхарадзе Т.Г., директор изд-ва «Научтехлитиздат», д.т.н. – председатель программного комитета (Москва);

Галиев А.Л., профессор СФ БашГУ, д.т.н. – сопредседатель программного комитета (Стерлитамак);

Куликов В.И., глава администрации городского округа город Стерлитамак (Стерлитамак);

Гаязов А.С., президент академии наук Республики Башкортостан, академик АН РБ, д.п.н., профессор (Уфа);

Kamal Kanti Nandi, профессор математики, Северо-Бенгальский университет (Индия);

Арипов Х.К., профессор каф. «Электроника и радиотехника» ТУИТ, д.ф.-м.н. (Ташкент);

Алымов М.И., директор Института структурной макрокинетики и проблем материаловедения имени А.Г. Мержанова РАН, д.т.н., проф., чл.корр. РАН, (Черноголовка);

Ахметова О.В., профессор СФ БашГУ, д.ф.-м.н. (Стерлитамак);

Биккулова Н.Н., зав. каф. ОиТФ, проф. СФ БашГУ, д.ф.-м.н. (Стерлитамак);

Алешин П.Н., зам. директора по НР и ИД СФ БашГУ, к.и.н., доцент (Стерлитамак);

Жулев В.И., зав. каф. ИИиБМТ РГРУ, д.т.н. (Рязань);

Калиев И.А., проф. СФ БашГУ, д.ф.-м.н. (Стерлитамак);

Коровин В.М., главный геофизик ОАО «Башнефтегео-физика», д.т.н., с.н.с. (Уфа);

Кризский В.Н., д.ф.-м.н., проф. Горного университета (Санкт-Петербург);

Куликов В.А., зав. каф. ВТ ИжГТУ, д.т.н. (Ижевск);

Михайлов П.Н., профессор СФ БашГУ, д.ф.-м.н. (Стерлитамак);

Миловзоров Г.В., д.т.н., проф., директор СПИ (Сарапул);

Мунасыпов И.М., декан ЕНФ СФ БашГУ, к.п.н. (Стерлитамак);

Мустафина С.А., д.ф.-м.н., проф. проректор по НИИР БашГУ (Уфа);

Мухамбетжанов С.Т., профессор Казахского государственного университета им Аль-Фараби (Алматы);

Нестеров В.Н., заместитель генерального директора по науке, начальник НТЦ ОАО «Самарский электромеханический завод», д.т.н. (Самара);

Павлюкевич Н.В., член корр. Нац. Академии Белоруси, д.ф.-м.н. (Минск);

Потапов А.А., доцент СФ БашГУ, к.ф.-м.н. (Стерлитамак);

Сабитов К.Б., член-корр. АН РБ, директор СФ ИСИ РБ, д.ф.-м.н. (Стерлитамак);

Сагдуллаев Ю.С., профессор ГНС «Московского НИИ телевидения», д.т.н. (Москва);

Хасанов М.М., ген. директор «Газпромнефть НТЦ», д.т.н. (Санкт-Петербург);

Шабаров А.Б., Заслуженный деятель науки РФ, Академик РАЕН, действ. член МАН ВШ и ГАК, д.т.н. (Тюмень);

Якшибаев Р.А., профессор БашГУ, д.ф.-м.н. (Уфа);

Ясовеев В.Х. профессор, УГАТУ, д.т.н. (Уфа);

Орлов А.В., к.т.н., доцент СФ БашГУ – ответственный секретарь.

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

Самхарадзе Т.Г., директор изд-тва «Научтехлитиздат», д.т.н. – председатель программного комитета (Москва);

Галиев А.Л., профессор СФ БашГУ, д.т.н. – сопредседатель программного комитета (Стерлитамак);

Филиппов А.И., профессор СФ БашГУ, д.т.н. (Стерлитамак);

Арипов Х.К., профессор каф. «Электроника и радиотехника» ТУИТ, д.ф.-м.н. (Ташкент);

Ахметова О.В., профессор СФ БашГУ, д.ф.-м.н. (Стерлитамак);

Биккулова Н.Н., зав. каф. ОиТФ СФ БашГУ, д.ф.-м.н. (Стерлитамак);

Зеленова М.А. доцент СФ БашГУ, к.ф.-м.н. (Стерлитамак);

Михайлов П.Н., профессор СФ БашГУ, д.ф.-м.н. (Стерлитамак);

Мунасыпов И.М., декан ЕНФ СФ БашГУ, к.п.н. (Стерлитамак);

Нестеров В.Н., заместитель генерального директора по науке, начальник НТЦ ОАО «Самарский электромеханический завод», д.т.н. (Самара);

Орлов А.В., доцент СФ БашГУ, к.т.н. (Стерлитамак);

Павлюкевич Н.В., член корр. Нац. Академии Белоруси, д.ф.-м.н. (Минск);

Потапов А.А., доцент СФ БашГУ, к.ф.-м.н. (Стерлитамак);

Сабитов К.Б., член-корр. АН РБ, зав. каф. Математического анализа СФ БашГУ, д.ф.-м.н. (Стерлитамак);

Сирожидинов Ш.С., ректор ТГУУЯиЛ им. Алишера Навои, д.фил.н. (Ташкент);

Шабаров А.Б., заслуженный деятель науки РФ, Академик РАЕН, действ. член МАН ВШ и ГАК, д.т.н. (Тюмень);

Ягафарова З.А., доцент СФ БашГУ, к.ф.-м.н. (Стерлитамак);

Якшибаев Р.А., директор ФТИ БашГУ, д.ф.-м.н. (Уфа).

СОДЕРЖАНИЕ

СЕКЦИЯ 1 «ФИЗИЧЕСКИЕ НАУКИ: ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ»

Айгишева Э.Э., Ахтарьянова Г.Ф.

*АНАЛИЗ СТАБИЛЬНОСТИ ТОНКОЙ ОБОЛОЧКИ
КРОТОВОЙ НОРЫ ШВАРЦШИЛЬДА – КАЗИМИРА* 16

Акманова Г.Р., Биккулова Н.Н., Якшибаев Р.А., Сафаргалиев Д.И., Цыганкова Л.В.

*ЭВОЛЮЦИЯ СТРУКТУРЫ СЕЛЕНИДОВ МЕДИ ПРИ
ИЗМЕНЕНИИ ДАВЛЕНИЯ* 20

Ахметова О.В., Ридзель С.А.

*ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗОНЫ ИССЛЕДОВАНИЯ
ТЕМПЕРАТУРНЫХ СИГНАЛОВ ПЛАСТА* 24

Балапанов М.Х., Ишембетов Р.Х., Кубенова М.М., Кутербеков К.А., Палымбетов Р.Ш., Байшева А.Х., Якшибаев Р.А.

*ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ
СВОЙСТВА НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СУЛЬФИДОВ
МЕДИ $K_xCu_{1.85}S$ ($0 < x < 0.05$)* 28

Балапанов М.Х., Ишембетов Р.Х., Кубенова М.М., Кутербеков К.А., Сахабаева С.М., Ахметгалиев Б.М., Якшибаев Р.А.

*ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ
СВОЙСТВА НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СУЛЬФИДОВ
МЕДИ $K_xCu_{1.97-x}S$ ($0 < x < 0.05$)* 34

Биккулова Н.Н., Якшибаев Р.А., Акманова Г.Р., Сафаргалиев Д.И.

*КОМПЬЮТЕРНЫЙ ДИЗАЙН ФАЗ ВЫСОКОГО
ДАВЛЕНИЯ СИСТЕМЫ Cu-Se* 41

Валитов Р.Р., Зеленова М.А.

*ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ
ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ВОЛН* 45

Давыдов А.П., Злыднева Т.П.

*ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ ДВУХ ОДИНОЧНЫХ ФОТОНОВ В
СХЕМЕ ОПЫТА ЮНГА В РАМКАХ МОДЕЛИРОВАНИЯ
ВОЛНОВОЙ ФУНКЦИИ ФОТОНА В КООРДИНАТНОМ
ПРЕДСТАВЛЕНИИ* 49

Давыдов А.П., Злыднева Т.П. <i>О КООРДИНАТНОЙ ВОЛНОВОЙ ФУНКЦИИ ДВУХ ФОТОНОВ В ЗАПУТАННОМ СОСТОЯНИИ НА ВЫХОДЕ ИЗ НЕЛИНЕЙНОГО КРИСТАЛЛА</i>	59
Зарипов С.Б. <i>ТРЕХМЕРНОГО СИММЕТРИЧНОГО ИНТЕГРАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ ТИПА ВОЛЬТЕРРА С СИНГУЛЯРНОЙ ОБЛАСТЕЙ</i>	69
Зеленова М.А., Комлев Д.И. <i>ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭТАПОВ РЕЛАКСАЦИИ И СТАБИЛИЗАЦИИ ДАВЛЕНИЯ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА ПРИЗАБОЙНУЮ ЗОНУ ПЛАСТА</i>	75
Зеленова М.А., Мукимов Р.А. <i>ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТЕПЕНИ КОРРОЗИИ В ТРУБАХ</i>	81
Каримов Р.Х., Измаилов Р.Н. <i>СТАБИЛЬНОСТЬ ВРЕМЕНИПОДОБНЫХ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ЛИНИЙ ЧЕРНЫХ ДЫР В ТЕОРИИ СТРУН</i>	86
Кожанов А.И., Сафиуллова Р.Р. <i>ОБРАТНЫЕ ЗАДАЧИ ДЛЯ ПСЕВДОГИПЕРБОЛИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ ЧЕТВЕРТОГО ПОРЯДКА</i>	92
Кондрашев О.Ф. <i>ВЯЗКОУПРУГАЯ МОДЕЛЬ ТЕЧЕНИЯ БЕЗГЛИНИСТЫХ БУРОВЫХ РАСТВОРОВ</i>	93
Курбангулов А.Р., Биккулова Н.Н., Якшибаев Р.А., Акманова Г.Р., Сафаргалиев Д.И. <i>МЕХАНИЗМ ИОННОГО ПЕРЕНОСА В ХАЛЬКОГЕНИДАХ МЕДИ И СЕРЕБРА</i>	98
Левина Т.М. <i>ОПТОВОЛОКОННЫЕ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МНОГОФАЗНЫХ ФЛЮИДОВ В ПРОЦЕССЕ БУРЕНИЯ СКВАЖИН</i>	102
Нигматуллина Г.Р., Биккулова Н.Н. <i>РЕНТГЕНОФАЗОВЫЙ АНАЛИЗ СЕЛЕНИДА МЕДИ ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СИНТЕЗА</i>	105

НИЗАМОВА А.Д., ВАЛИЕВ А.А.	
<i>К ЧИСЛЕННОМУ МЕТОДУ ИССЛЕДОВАНИЯ</i>	
<i>ВЫТЕСНЕНИЯ НЕФТИ ВОДОЙ В ПЛОСКОМ КАНАЛЕ.....</i>	111
РАХМАТУЛЛИНА А.С., КАЗАКОВА Е.В.	
<i>МЕТОДЫ ТЕРМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ПОЛИМЕРОВ.....</i>	114
РАХМАТУЛЛИНА А.С., КАЗАКОВА Е.В.	
<i>ПОЛУЧЕНИЕ ПОЛИУРЕТАНА. СПОСОБЫ ЕГО</i>	
<i>МОДИФИКАЦИИ.....</i>	118
САФАРГАЛИЕВ Д.И., БИККУЛОВА Н.Н., ЯКШИБАЕВ Р.А.,	
АКМАНОВА Г.Р., КУРБАНГУЛОВ А.Р.	
<i>ЗОННАЯ СТРУКТУРА КВАНТОВЫХ ТОЧЕК НА ОСНОВЕ</i>	
<i>СЕЛЕНИДА МЕДИ.....</i>	122
ФИЛИППОВ А.И.	
<i>ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ</i>	
<i>ВОЛНЫ ГОРЕНИЯ.....</i>	126
ФИЛИППОВ А.И., ЗЕЛЕНОВА М.А.	
<i>ПОЛЯ ДАВЛЕНИЯ В НЕФТЕГАЗОВОМ ПЛАСТЕ ПРИ</i>	
<i>КРАТКОВРЕМЕННОМ ОТБОРЕ ИЗ ПЛАСТА И (ИЛИ)</i>	
<i>СКВАЖИНЫ.....</i>	136
ФИЛИППОВ А.И., ЗЕЛЕНОВА М.А.	
<i>СОПОСТАВЛЕНИЕ ПОЛЕЙ ДАВЛЕНИЯ В ПЛАСТЕ ДЛЯ</i>	
<i>СЛУЧАЕВ МГНОВЕННОГО ОТБОРА ИЗ ПЛАСТА И</i>	
<i>СКВАЖИНЫ.....</i>	142
ЮСУПОВА Р.М., ИЗМАЙЛОВ Р.Н.	
<i>СВОЙСТВА ТОНКОГО АККРЕЦИОННОГО ДИСКА</i>	
<i>ВОКРУГ ЧЕРНОЙ ДЫРЫ ХЭЙВОРДА.....</i>	147
ЯГАФАРОВА З.А., НИГМАТУЛЛИНА Л.И., НИГМАТУЛЛИНА Г.Р.	
<i>ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЯВЛЕНИЯ ОБЛИТЕРАЦИИ ПРИ</i>	
<i>ЛЕЧЕНИИ СОСУДИСТЫХ ПАТОЛОГИЙ.....</i>	151
ЯКШИБАЕВ Р.А., БИККУЛОВА Н.Н., АКМАНОВА Г.Р., САФАРГАЛИЕВ Д.И.	
<i>ЗОННАЯ СТРУКТУРА КВАНТОВЫХ ТОЧЕК</i>	
<i>ТЕЛЛУРИДА СЕРЕБРА.....</i>	155

СЕКЦИЯ 2 «ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ: ДОСТИЖЕНИЯ И
ПРОБЛЕМЫ ИНТЕГРАЦИИ НАУКИ, ТЕХНИКИ И
ПРОИЗВОДСТВА»

Антонов К.В., Грабовская А.П., Жумабаев Д.Д. <i>ОЦЕНКА НЕФТЕНАСЫЩЕННОГО ПОТЕНЦИАЛА МЕЖСКВАЖИННОГО ПРОСТРАНСТВА СЕЙСМИЧЕСКИМ ЗОНДИРОВАНИЕМ</i>	159
Антонов К.В., Грабовская А.П., Жумабаев Д.Д. <i>ДИНАМИКА ДОБЫЧИ НЕФТИ И ПОТЕНЦИАЛ УГЛЕВОДОРОДНОГО СЫРЬЯ НЕДР БАШКОРТОСТАНА. 167</i>	
Арипов Х.К., Арипова З.Х., Тошматов Ш.Т., Хайруллаев Х.Х. <i>КОМПЛЕМЕНТАРНЫЙ КАСКОДНЫЙ ИСТОЧНИК ТОКА</i>	175
Арипова З.Х., Арипова У.Х., Тошматов Ш.Т. <i>КАСКОДНЫЙ ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ С УСИЛЕНИЕМ.....</i>	179
Арипова З.Х., Арипов Х.К., Тошматов Ш.Т. <i>СОСТАВНОЙ КАСКОДНЫЙ ИНЖЕКЦИОННО- ВОЛЬТАИЧЕСКИЙ ТРАНЗИСТОР.....</i>	183
Гаврилов И.А., Мухамедова Д.Б., Носиров.Х.Х. <i>КОНТУРНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРНЫХ ТОЧЕК СТЕРЕОПАРЫ НА ОСНОВЕ БИНАРНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ.....</i>	188
Гаврилов И.А., Мухамедова Д.Б., Ахмедова А.Х. <i>КОНТУРНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ ВИДЕООБЪЕКТОВ ПО ИХ БИНАРНЫМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ.....</i>	194
Галиев А.Л., Орлов А.В., Юмагулов Н.И. <i>СИСТЕМА ДЛЯ ЭЛЕКТРОАКУПНКТУРЫ ИМПУЛЬСНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ</i>	199
Губенко В.А., Шахобиддинов А.Ш., Хатамов А.П. <i>ПРОБЛЕМЫ И КОНТРОЛЬ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ В ЖИЛЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ</i>	205
Денисова О.А., Щеглов А.В. <i>ПОСТРОЕНИЕ ФАЦИАЛЬНОЙ МОДЕЛИ</i>	210
Денисова О.А., Щеглова Е.П. <i>ПОСТРОЕНИЕ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ МАЛЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ</i>	215

Ёдгорова Д.М., Шерматов Ж. Г., Закиров Р.Г. <i>ПРИМЕНЕНИЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ ДЛЯ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ КОМПОЗИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ</i>	219
Зарипов О.О., Закиров Р.Г., Умаров А.А. <i>СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ И КОНСТРУКЦИИ ВОЗДУШНОГО СУДНА</i>	223
Каплан М.Б. <i>СБОРКА ИНТЕГРАЛЬНОЙ МЕТОДИКИ ДЛЯ УСТРОЙСТВА ГРУППОВОЙ МАГНИТОТЕРАПИИ</i>	228
Короткова Л.А. <i>АВТОМАТИЗАЦИЯ РОБОТОТЕХНИКИ В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ</i>	231
Миловзоров Д.Г., Галиев А.Л., Ахметов, Ш.Р. <i>СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ АЛГОРИТМОМ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТРЕХКОМПОНЕНТНОГО ФЕРРОЗОНДОВОГО ГРАДИЕНТОМЕТРА С ВАРЬИРУЕМОЙ БАЗОЙ</i>	235
Минеев А.В., Ясовеев В.Х. <i>СТРУКТУРА ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ РАДИАЛЬНЫХ ЗАЗОРОВ</i>	244
Муллакаев Р.М. <i>ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗРАБОТАННОГО МОБИЛЬНОГО СОНОХИМИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА</i>	249
Мунасыпов И.М., Стуколов Д.А. <i>РАЗВИТИЕ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ В МАШИНОСТРОЕНИИ</i>	260
Очилов Б.Х., Хасанов М.М. <i>МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ МНОГОМОДОВЫХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ</i>	265
Сухинец Ж.А., Галиев А.Л., Гулин А.И. <i>РАЗРАБОТКА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ГАЗОВОГО ПОТОКА С ПРОГРАММНЫМ БЛОКОМ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ</i>	270

ТИМОФЕЕВ А.О., ЯСОВЕЕВ В.Х. <i>РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА ДИАГНОСТИКИ И УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ШТАНГОВОЙ ГЛУБИННОНАСОСНОЙ УСТАНОВКИ</i>	280
ХАСАНОВ М.М. <i>ПРИМЕНЕНИЕ ПРИСАДОК ИЗ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ В ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ УСИЛИТЕЛЯХ</i>	287
ЮСУПОВ Я.Т. <i>ОБЗОР СПОСОБОВ ОЦЕНИВАНИЯ СОСТОЯНИЯ РАДИОКАНАЛА</i>	292
ЯКИМОВ В.Н., ИБАТОВ Р.Ш. <i>ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ И ОПЕРАТИВНОСТИ УЧЕТА НЕФТЕПРОДУКТОВ ПРИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЯХ НА НЕФТЕБАЗАХ.....</i>	299
ЯКИМОВ В.Н. <i>ОЦЕНКА РЕЗОНАНСНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ЧАСТОТНОГО СПЕКТРА НА ОСНОВЕ МЕТОДА ПЕРИОДОГРАММ И БИНАРНО-ЗНАКОВОГО СТОХАСТИЧЕСКОГО КВАНТОВАНИЯ.....</i>	304
ЯСОВЕЕВ В.Х., ШМЕЛЕВ А.А., МУХАМЕТОВА Г.З. <i>РАСЧЕТ ПОПРАВОЧНОГО КОЭФИЦИЕНТА ДЛЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО МАГНИТОСТРИКЦИОННОГО ДАТЧИКА ЛИНЕЙНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ МЕТОДОМ КУБИЧЕСКИХ СПЛАЙНОВ</i>	310

СЕКЦИЯ 3 «МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ»

БАШМАКОВ Р.А., ШАГАПОВ В.Ш., ФОКЕЕВА Н.О. <i>ЗАВИСИМОСТЬ МЕЖДУ ДАВЛЕНИЕМ И РАСХОДОМ ПРИ ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ СКВАЖИНЫ С ГРП.....</i>	316
ВИШНЕВСКИЙ А.А., ЯСОВЕЕВ В.Х. <i>ПРОЧНОСТНОЙ АНАЛИЗ МЕМБРАНЫ ВОЛОКОННО- ОПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА ДАВЛЕНИЯ.....</i>	320

Жильников А.А., Жильников Т.А., Жулев В.И. <i>ПРЯМОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ТОМОГРАФИИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ОТРАЖЕНИЙ</i>	331
ЗЕЛЕНОВА М.А., РАХМАТУЛЛИН А.Р. <i>ВОЗНИКНОВЕНИЕ БАГОВ В ХОДЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ПРИ МАТЕМАТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ</i>	335
ИЗВЕКОВ Ю.А., ГУГИНА Е.М., ШЕМЕТОВА В.В. <i>НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ВЫБОРА И ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ОСНОВНЫХ ЦЕХОВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРЕДПРИЯТИЯ</i>	339
КАРТАВЦЕВА И.А., ХАБИБУЛЛИН И.Л. <i>МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИТОКА ЖИДКОСТИ К СКВАЖИНЕ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ СТВОЛА СКВАЖИНЫ И НАЛИЧИЯ СКИН-ЗОНЫ</i>	342
ЛИКОНЦЕВ А.Н., ЛЯЛИНА А.Ж. <i>РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ СПУТНИКОВОГО КАНАЛА СВЯЗИ СИСТЕМЫ HTS В SIMULINK</i>	355
МИЛОВЗОРОВ Д.Г., ЯСОВЕЕВ В.Х. <i>ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОПРАВОЧНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТРЕХКОМПОНЕНТНОГО ФЕРРОЗОНДОВОГО МАГНИТОМЕТРА</i>	361
НАФИКОВА А.Р., КРИЗСКИЙ В.Н. <i>О РАЗРАБОТКЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА РАДОНА В АНИЗОТРОПНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДАХ</i>	367
НЕСТЕРОВ В.Н. <i>КОНЦЕПЦИЯ ВЕКТОРНЫХ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН: ОТ КОНЦЕПЦИИ К МОДЕЛЯМ, ОТ МОДЕЛЕЙ К ИЗМЕРЕНИЯМ</i>	372
ПАВЛОВ О.Ю., ЗИНАТУЛЛИН С.О. <i>ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ ДЛЯ ПРИЛОЖЕНИЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ</i>	380
РАСУЛОВ М.С., НОРОВ А.К. <i>ЗАДАЧА СО СВОБОДНОЙ ГРАНИЦЕЙ ДЛЯ ДИФFUЗНОЙ МОДЕЛИ ЛОТКИ-ВОЛЬТЕРРА</i>	384

Фёдоров Ю.И. <i>НЕПРЕРЫВНАЯ МОДЕЛЬ ЗАГРУЗКИ ДАННЫХ В ЛОКАЛЬНУЮ БАЗУ ДАННЫХ УДАЛЁННОГО КОМПЬЮТЕРА.....</i>	389
Хусаинов И.Г. Хусаинова Г.Я. <i>МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОПРЕССОВКИ СФЕРИЧЕСКОЙ ПОЛОСТИ.....</i>	394
Хусаинова Г.Я. <i>ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ ФИЛЬТРАЦИИ АНОМАЛЬНОЙ ЖИДКОСТИ.....</i>	398
Шагапов В.Ш., Рафикова Г.Р., Каримова Г.Р. <i>ВОЛНЫ СТОУНЛИ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА ЖИДКОСТИ И ПЛАСТА, НАСЫЩЕННОГО ГИДРАТОМ....</i>	402
Шагапов В.Ш., Рафикова Г.Р., Мамаева З.З. <i>ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАТУХАЮЩИХ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ЖИДКОСТИ В СКВАЖИНЕ, ВОЗНИКШИХ ПРИ ГИДРОУДАРЕ.....</i>	404
Ягафарова З.А., Сафаргалиев Д.И., Ягафаров С.Р. <i>ЗОННАЯ СТРУКТУРА ДИХАЛЬКОГЕНИДА ЦИРКОНИЯ И ЕГО ИНТЕРКАЛАТНОГО СОЕДИНЕНИЯ.....</i>	407
 СЕКЦИЯ 4 «ВИРТУАЛЬНАЯ И ДОПОЛНЕННАЯ РЕАЛЬНОСТЬ, ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ»	
Абдрафикова Ф.Ф., Муравьева Е.А., Шарипов М.И. <i>ПРЕДСКАЗАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПРОДУКТИВНОСТИ ДОБЫВАЮЩЕЙ СКВАЖИНЫ С ПОМОЩЬЮ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В ПРОГРАММЕ МАТЛАВ</i>	415
Коннов В.А., Муравьева Е.А., Шарипов М.И. <i>СРАВНИТЕЛЬНЫЙ ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ ПРОГРАММНЫХ СИСТЕМ ПОДБОРА ОБОРУДОВАНИЯ УСТАНОВОК ЭЛЕКТРОЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ</i>	420
Павлов О.Ю., Мулюков Р.Ф., Гимранов А.И., Халимов Б.А. <i>ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНА ФОРМИРОВАНИЯ УПРАВЛЕНИЯ И РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ ПИД РЕГУЛЯТОРА</i>	425

САГДАТУЛЛИН А.М.	
<i>ПРИМЕНЕНИЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ ДЛЯ ПРИЛОЖЕНИЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ИЗМЕНЯЮЩИХСЯ ПАРАМЕТРОВ</i>	430
ЯГАФАРОВА З.А.	
<i>ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА «ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЙ МЕТОД ИЗУЧЕНИЯ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТВЕРДЫХ ЭЛЕКТРОЛИТОВ»</i>	434
 СЕКЦИЯ 5 «ПРОБЛЕМЫ ОБУЧЕНИЯ В СОВРЕМЕННОМ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОМ ПРОСТРАНСТВЕ»	
ИВАНОВ М.В., ГАЛИЕВ Р.Д., ХАТМУЛЛИНА М.Т.	
<i>ПОСТАНОВКА ЛЕКЦИОННОЙ ДЕМОНСТРАЦИИ «ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ФЕРРОМАГНЕТИКА»</i>	438
КОНОПЛЯ В.М., ФИЛЯКОВА О.В.	
<i>КОМПЕТЕНТНОСТНЫЙ И ДЕЯТЕЛЬНОСТНЫЙ ПОДХОД В ОБРАЗОВАНИИ</i>	443
КОРОТКОВА Л.А.	
<i>ДИДАКТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ МОТИВАЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ СТУДЕНТОВ В УСЛОВИЯХ КРЕДИТНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ОБУЧЕНИЯ</i>	448
КУЗИН Е.Б., МЕДВЕДЕВ Р.Е.	
<i>ПРИМЕНЕНИЕ ДИСТАНЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ОБУЧЕНИЯ В ОБРАЗОВАТЕЛЬНОМ ПРОЦЕССЕ АКАДЕМИИ ФСИН РОССИИ В УСЛОВИЯХ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ КОРОНАВИРУСНОЙ ИНФЕКЦИИ (COVID-19)</i>	451
МИХАЙЛОВ П.Н., МИХАЙЛОВА В.В.	
<i>С ЧЕГО НАЧИНАЕТСЯ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ?</i>	457
МИХАЙЛОВ П.Н., МИХАЙЛОВА В.В.	
<i>ВЫВОД ЛОГИЧЕСКИХ СЛЕДСТВИЙ – ВАЖНЫЙ ЭЛЕМЕНТ ПОИСКА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ</i>	464
МОРОЗОВА О.А., МУХТАРОВА Г.Р.	
<i>О ВНЕУРОЧНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПО ФИЗИКЕ В 7-ЫХ КЛАССАХ (ИЗ ОПЫТА РАБОТЫ)</i>	469
МУНАСЫПОВ И.М.	
<i>ПОДГОТОВКА БАКАЛАВРОВ ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБУЧЕНИЯ С УЧЕТОМ СТАНДАРТА КОМПЕТЕНЦИЙ WORLDSKILLS INTERNATIONAL</i>	474

Мусина Л.Р.	
<i>ЦИФРОВЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ В ОБРАЗОВАНИИ</i>	478
Мухтарова Г.Р., Морозова О.А.	
<i>ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЦИФРОВОЙ ЛАБОРАТОРИИ</i>	
<i>«АРХИМЕД» НА УРОКАХ ФИЗИКИ</i>	483
Несмиянова О.В.	
<i>ТЕХНОЛОГИЯ ОРГАНИЗАЦИЯ УРОКА С</i>	
<i>ПРИМЕНЕНИЕМ КЛЮЧЕВЫХ УЧЕБНЫХ СИТУАЦИЙ</i>	
<i>В УСЛОВИЯХ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ.....</i>	487
Орлов А.В., Галиев А.Л.	
<i>КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НА</i>	
<i>КРУЖКОВЫХ ЗАНЯТИЯХ ПО ФИЗИКЕ.....</i>	492
Павлов О.Ю., Гизатулин Р.М., Зарипов С.Э.	
<i>ОСОБЕННОСТИ МЕТОДА И ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ</i>	
<i>СТРУКТУРЫ АДАПТИВНОГО ОБУЧЕНИЯ</i>	
<i>НА ОСНОВЕ МЕТОДА ГЕЙМИФИКАЦИИ.....</i>	497
Павлов О.Ю., Семенов К.С.	
<i>ОСОБЕННОСТИ МЕТОДА И ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ</i>	
<i>СТРУКТУРЫ АДАПТИВНОГО ОБУЧЕНИЯ</i>	
<i>НА ОСНОВЕ МЕТОДА ГЕЙМИФИКАЦИИ.....</i>	502
Полякова Л.В.	
<i>РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ</i>	
<i>ДИФФЕРЕНЦИРОВАННЫХ ЗАДАНИЙ ПО КОНЕЧНОМУ</i>	
<i>РЕЗУЛЬТАТУ И ЧЕРЕЗ ДИАЛОГ НА УРОКАХ ФИЗИКИ....</i>	507
Рабчук Л.В.	
<i>РЕЗУЛЬТАТЫ АНКЕТИРОВАНИЯ СТУДЕНТОВ ПО</i>	
<i>ВОПРОСУ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ</i>	514
Свирская Л.М.	
<i>ИЗУЧЕНИЕ ФИЗИКИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ</i>	
<i>НА ОСНОВЕ ЗАДАЧ.....</i>	518
Тлегенова Л.В.	
<i>РАЗРАБОТКА УРОКА ИНФОРМАТИКИ ДЛЯ 9-ГО</i>	
<i>КЛАССА «ПЕРЕСТАНОВКА ЭЛЕМЕНТОВ МАССИВА».....</i>	522
Хужин Р.А.	
<i>ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ДИСТАНЦИОННОГО</i>	
<i>ОБУЧЕНИЯ ПО ФИЗИЧЕСКОЙ КУЛЬТУРЕ В ПЕРИОД</i>	
<i>САМОИЗОЛЯЦИИ В ВУЗАХ</i>	527

Секция 1
«ФИЗИЧЕСКИЕ НАУКИ: ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ
И ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ»

УДК 523.11

Айгишева Э.Э., Ахтарьянова Г.Ф.

**АНАЛИЗ СТАБИЛЬНОСТИ ТОНКОЙ ОБОЛОЧКИ
КРОВОЙ НОРЫ ШВАРЦШИЛЬДА – КАЗИМИРА**

В работе получена модель кротовой норы с тонкой оболочкой, полученной путем сшивки внутренней области, описываемой решением для кротовой норы Казимира и внешней области, описываемой решением Шварцшильда. Проведен анализ стабильности модели и получены диапазоны значений параметров тонкой оболочки, при которых модель является устойчивой при внешних возмущениях.

Ключевые слова: кротовая нора, тонкая оболочка, область стабильности, горловина кротовой норы.

Aygisheva E.E., Akhtaryanova G.F.

**STABILITY ANALYSIS OF THE THIN SHELL
SCHWARZSCHILD – CASIMIR WORMHOLE**

In this work, a model of a wormhole with a thin shell obtained by gluing the inner region described by the solution for the Casimir wormhole and the outer region described by the Schwarzschild solution has been obtained. An analysis of the stability of the model is carried out and the ranges of values of the parameters of a thin shell are obtained, at which the model is stable under external perturbations.

Keywords: wormhole, thin shell, stability zone, wormhole throat.

Идея кротовых нор была впервые предложена Эйнштейном и Розеном в 1935 году [1]. Под кротовыми норами принято понимать гипотетические топологические туннели, которые соединяют две вселенные или две отдаленные области пространства-времени, являющиеся решениями общей теории относительности (ОТО) Эйнштейна или модифицированных теорий гравитации. Однако, для существования объектов такого типа необходимо наличие «экзотической» материи, для которой нарушается одно или несколько энергетических ус-

ловий. Одной из моделей такой материи является «фантомная энергия», которая нарушает нулевое энергетическое условие и представляет собой материю с отрицательной плотностью энергии. В ОТО «фантомная энергия» вводится для объяснения ускоренного расширения Вселенной [2], что может говорить о наличии «экзотической» материи в ней.

Исследование стало особенно актуальным после публикации недавней работы Конопки и Жиденко [3], где они показали, что квазинормальные моды, испускаемые от слияния двух кротовых нор неотличимы от квазинормальных мод двух сталкивающихся черных дыр. Таким образом, несмотря на то, что кротовые норы еще не были обнаружены, интерес к исследованию объектов такого типа остается по-прежнему высоким в научной литературе [4,5].

Кротовые норы также используются для объяснения квантовой запутанности [6]. Казимиром было показано, что между пластинами существует конечная энергия, а также вычислена конечная сила между пластинами [7]. Энергия Казимира указывается как потенциальный источник гравитационной энергии, а также используется для доказательства существования отрицательной плотности энергии, которую можно получить в лабораторных условиях. Кротовая нора Казимира - это проходима кротовая нора, которую можно создать, используя энергию Казимира [8]. В работе проведен анализ стабильности кротовой норы с тонкой оболочкой Шварцшильда-Казимира, полученной путем сшивки кротовой норы Казимира с внутренней стороны и пространством-временем Шварцшильда с внешней стороны с помощью метода Гарсия-Лобо-Виссеры (ГЛВ) [9]. Этот метод предназначен для исследования линейных сферических возмущений на тонкую оболочку кротовой норы. Для использования метода ГЛВ необходимо вычислить функции формы и красного смещения пространств-времен по обеим сторонам от тонкой оболочки.

Внутренняя область кротовой норы с тонкой оболочкой будет описываться метрикой Казимира, которая в стандартных координатах задается в виде

$$ds_-^2 = -\left(\frac{3r}{3r + r_0}\right)^2 dt^2 + \left(1 - \frac{2r_0}{3r} - \frac{r_0^2}{3r^2}\right)^{-1} dr^2 + r^2 d\Omega^2, \quad (1)$$

где r_0 – радиус горловины кротовой норы, $d\Omega^2 = d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2$ – единичная сфера. Функция формы и функция красного смещения кротовой норы Казимира могут быть получены в виде

$$b_- = \frac{r_0(2r + r_0)}{3r}, \quad \Phi_- = \frac{1}{2} \ln \left[\frac{27r^4}{(r - r_0)(3r + r_0)^3} \right]. \quad (2)$$

Внешняя область кротовой норы с тонкой оболочкой будет описываться метрикой Шварцшильда, которая в стандартных координатах задается в виде

$$ds_+^2 = -\left(1 - \frac{2M}{r}\right) dt^2 + \left(1 - \frac{2M}{r}\right)^{-1} dr^2 + r^2 d\Omega^2, \quad (3)$$

где M – асимптотическая масса черной дыры Шварцшильда. Функция формы и функция красного смещения пространства-времени Шварцшильда, соответственно, имеют вид

$$b_+ = 2M, \quad \Phi_+ = 0. \quad (4)$$

С помощью процедуры «вырезать и вставить» склеиваются кротовая нора Казимира (1) и пространство-время Шварцшильда (3) на некотором радиусе $r = a_0 > 2M, r_0$, то есть мы соединяем два пространства-времени, Казимира и Шварцшильда, в радиусе над горизонтом Шварцшильда. Внутренние области $r < 2M, r_0$ вырезаются из соответствующих пространств-времен, таким образом, модель не будет содержать горизонта событий.

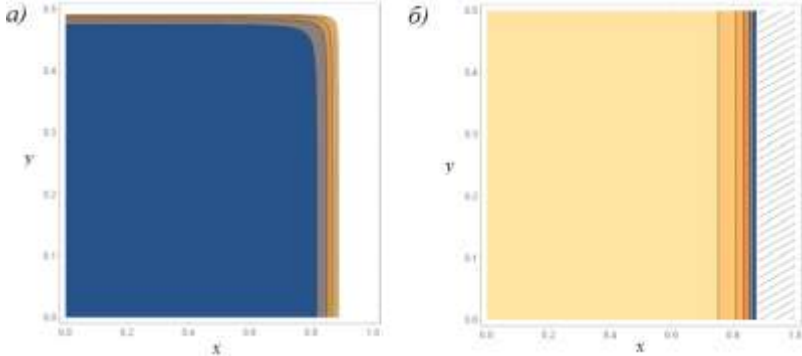


Рис. 1. Область стабильности тонкой оболочки кротовой норы Шварцшильда-Казимира определенная ограничением по массе (а) и по силе (б)

Следуя методу ГЛВ, получим ограничения по массе и по силе, которые показывают область стабильности тонкой оболочки полученной модели кротовой норы

$$m_s'' = \frac{3x^2(1+x^2)}{(1-x)^3(3+x)^3} + \frac{x^2}{\sqrt{9-6x-3x^2}} + \frac{y^2}{(1-2y)^{3/2}}, \quad (5)$$

$$a_0^4 [4\pi\Xi(a_0)a_0]'' \geq \frac{4x^3(18+19x-14x^2-3x^3) - a_0x^2(216-174x)}{\sqrt{3}(3-2x-x^2)^{5/2}} - \frac{a_0x^4(31+8x-2x^2)}{\sqrt{3}(3-2x-x^2)^{5/2}}, \quad (6)$$

где $x = r_0 / r$ и $y = M / r$. Поскольку в работе рассматриваются значения, удовлетворяющие условию $r_0 \leq a_0$, то, соответственно, $x \leq 1$. Пределы значения второго безразмерного параметра y можно определить из условия $r_{\text{гор}} = 2M \leq a_0$, откуда получаем, что $y \leq 0,5$.

На рис. 1 представлен график зависимости ограничения по массе (а) и по силе (б) кротовой норы Шварцшильд - Казимира. Из рис. 1а следует, что область стабильности тонкой оболочки определена заштрихованной областью, то есть, кротовая нора стабильна при $x \geq 0,9$ и $y \approx 0,5$. Из рис. 1б следует, что область стабильности тонкой оболочки определена заштрихованной областью, то есть, кротовая нора стабильна при $x \geq 0,9$, независимо от y .

Таким образом, тонкая оболочка стабильна при $y \approx 0,5$ и $x \geq 0,9$. Следовательно, допустимый диапазон значений горловины рассматриваемой модели кротовой норы определен в промежутке $r_0 \in [0,9a_0; a_0]$.

Библиографический список

1. Einstein A., Rosen N. The Particle Problem in the General Theory of Relativity // Physical Review. 1935. Vol. 48. P. 73-77.
2. Riess A.G. et. al. Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant // The Astronomical Journal. 1998. Vol. 116. P. 1009-1038.
3. Konoplya R.A., Zhidenko A. Wormholes versus black holes: quasinormal ringing at early and late times // Journal of Cosmology and Astroparticle Physics. 2016. Vol. 2016, no. 12. P. 043.

4. Lukmanova R. *et. al.* Note on the Schwarzschild-phantom wormhole // Indian Journal of Physics. 2016. Vol. 90. P. 1319-1323.

5. Karimov R.Kh., Izmailov R.N. Thin shell Schwarzschild-phantom wormhole stability // Chelyabinsk Physical and Mathematical Journal. 2017. Vol. 2. P. 245-252.

6. Marolf D., Polchinski J. Gauge-Gravity Duality and the Black Hole Interior // Physical Review Letters. 2013. Vol. 111. P. 171301.

7. Casimir H.B.G. On the Attraction Between Two Perfectly Conducting Plates // Proceedings of Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen. 1948. Vol. 51. P. 793-795.

8. Garattini R. Casimir wormholes // The European Physical Journal C. 2019. Vol. 79. P. 951.

9. Garcia M., Lobo F.S.N., Visser M. Generic spherically symmetric dynamic thin-shell traversable wormholes in standard general relativity // Physical Review D. 2012. Vol. 86. P. 044026.

Сведения об авторах

Айгишева Элина Эдуардовна, магистрант, БГПУ им. М.Акмоллы (Уфа), E-mail: aigisheva.elina@yandex.ru.

Ахтарьянова Гульназ Фанисовна, старший преподаватель кафедры физики и нанотехнологий, БГПУ им. М.Акмоллы (Уфа), E-mail: akht_gul@mail.ru.

УДК 538.913

Акманова Г.Р., Биккулова Н.Н., Якшибаев Р.А.,

Сафаргалиев Д.И., Цыганкова Л.В.

ЭВОЛЮЦИЯ СТРУКТУРЫ СЕЛЕНИДОВ МЕДИ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ДАВЛЕНИЯ

В работе приведен анализ изменения структуры селенидов меди при повышении давления.

Ключевые слова: суперионные проводники, фазовая диаграмма, зонная структура, высокое давление.

**Akmanova G.R., Bikkulova N.N., Yakshibaev R.A.,
Safargaliev D.I., Tsygankova L.V.**

**EVOLUTION OF THE STRUCTURE OF COPPER SELENIDES
WITH CHANGING PRESSURE**

The paper analyzes the changes in the structure of shallow selenides with increasing pressure.

Key words: superionic conductors, phase diagram, cell parameters, high pressure.

Модельные компьютерные расчеты фазовой диаграмм системы Cu-Se проведены с помощью программы USPEX [1,2]. Уточнены структуры селенидов меди стехиометрических и нестехиометрических составов. Селениды меди являются структурно-разупорядоченными соединениями в суперионном состоянии [3-5]. Суть поиска наиболее устойчивой структуры сводится к вычислению такого состояния вещества, которое обладает наименьшей энергией. Энергия в данном случае зависит от электромагнитного взаимодействия ядер и электронов атомов, из которых состоит исследуемый кристалл. Ее можно оценить с помощью квантово-механических расчетов, основанных на упрощенном уравнении Шредингера. Так в алгоритме USPEX используется теория функционала плотности, которая получила развитие во второй половине прошлого века. Ее основная цель заключается в упрощении расчетов электронной структуры молекул и кристаллов. Теория позволяет заменить многоэлектронную волновую функцию электронной плотностью, при этом оставаясь формально точной [1]. На практике это приводит к уменьшению сложности вычислений и, как следствие, времени, которое на них будет затрачено. Таким образом, квантово-механические расчеты сочетаются с эволюционным алгоритмом в USPEX [1]. Поиск таких структур в системе Cu-Se при различных давлениях от 0 до 5 GPa показал, что при абсолютном нуле и давлении 0.1 GPa стабильным является состав Cu_6Se_4 . Экспериментальная фазовая диаграмма при нормальных условиях содержит тетрагональную фазу $P\bar{4}2_1m$ с параметрами ячейки $a=6.40 \text{ \AA}$, $c=4.28 \text{ \AA}$ [3].

При низких температурах и высоких давлениях стабильной оказывается фаза состава Cu_6Se_4 . Структуры и параметры стабильных фаз полученных при расчете представлены в табл.1., рис.1.

Из результатов теоретического расчета следует, что тетрагональная сингония при низких температурах переходит в тригональную. Повышение давления приводит к уменьшению параметров элементарно ячейки и тригональная сингония переходит в моноклинную. Дальнейшее повышение давления приводит к уменьшению параметров ячейки. Моноклинная сингония сохраняется.

Таблица 1 – Структуры и параметры ячейки при различных давлениях

№	Формула	Давление	Параметры ячейки					
			a, Å	b, Å	c, Å	α , град	β , град	γ , град
1	Cu ₆ Se ₄	0.1 GPa	6.15602	6.14684	4.71314	90.0284	89.7724	89.9525
2	Cu ₆ Se ₄	1 GPa	6.12349	4.68574	4.68574	90.0427	89.9822	90.0039
3	Cu ₆ Se ₄	5 GPa	6.00227	6.01214	4.66337	90.1078	90.0815	89.9745

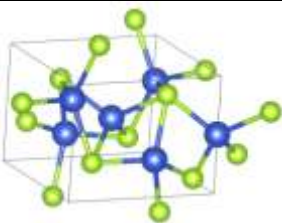
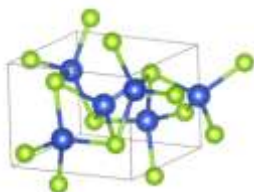
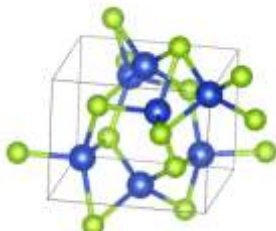
№	Формула	Давление	Структура
1	Cu ₆ Se ₄	0.1 GPa	
2	Cu ₆ Se ₄	1 GPa	
3	Cu ₆ Se ₄	5 GPa	

Рис.1. Рассчитанные структуры Cu₆Se₄ при различных давлениях

Для уточнения стабильности теоретически полученных фаз ведутся расчеты фононных спектров и будет проведен расчет энтальпии и энтропии.

Работа подготовлена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-32-90216.

Библиографический список

1. USPEX (Universal Structure Predictor: Evolutionary Xtallography) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://uspeh-team.org>
2. Цыганкова (Биккулова) Л.В., Тихонов Е.В., Биккулова Н.Н., Нигматуллина Г.Р., Сафаргалиев Д.И., Курбангулов А.Р., Акманова Г.Р. Модельный расчет фазовой диаграммы Cu-Se // Инженерная физика. 2019. № 7, С.80-84.
3. Джон У. Энтони, Ричард А. Бидо, Кеннет В. Блад, Монте К. Николс Справочник по минералогии. // Минералогическое общество Америки. 2001 <https://deru.abcdef.wiki/wiki/Umangit>
4. Брандт Н. Б., Кульбачинский В. А. Квазичастицы в физике конденсированного состояния. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. 632 с.
5. Горбачев В.В. Полупроводниковые соединения A2IBIV // М.: Металлургия, 1980. 132 с.

Сведения об авторах

Акманова Гузель Рифкатовна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей физики физико-технического института БашГУ. E-mail: grakmanova@mail.ru.

Биккулова Нурия Нагимовна, доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой общей и теоретической физики Стерлитамакского филиала БашГУ. E-mail: bickulova@mail.ru.

Якшибаев Роберт Асгатович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры общей физики физико-технического института БашГУ, E-mail: yakshibaev5252@mail.ru.

Сафаргалиев Данир Ильдарович, аспирант кафедры общей физики физико-технического института БашГУ. E-mail: danirsafargaliev@gmail.com.

Цыганкова Ляйсан Валиулловна, старший преподаватель кафедры общей и теоретической физики Стерлитамакского филиала БашГУ. E-mail: blv-str@mail.ru.

Ахметова О.В., Ридзель С.А.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗОНЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ СИГНАЛОВ ПЛАСТА

Обсуждается зона подхода температурного сигнала пласта, обусловленного процессами, происходящими в призабойной зоне. Показано, что существует зона влияния температурных сигналов пласта, размеры которой меньше зоны конвективного влияния. На основе численного эксперимента иллюстрируется затухание температурного сигнала пласта при его движении вдоль ствола скважины.

Ключевые слова: температурное поле, скважина, температурный сигнал пласта

Akhmetova O.V., Ridzel S.A.

DETERMINATION OF THE STUDY AREA OF TEMPERATURE SIGNALS OF THE FORMATION

The zone of approach of the reservoir temperature signal caused by the processes occurring in the bottomhole zone is discussed. It is shown that there is a zone of influence of temperature signals of the formation, the size of which is smaller than the zone of convective influence. On the basis of a numerical experiment, the attenuation of the temperature signal of the formation as it moves along the wellbore is illustrated.

Key words: temperature field, well, reservoir temperature signal.

Результаты полевых и теоретических исследований показали, что температурное поле в скважине чувствительно к изменениям в призабойной зоне пласта [1 – 3]. Чем ближе к интервалу перфорации получены измерения температуры, тем более они соответствуют пластовым значениям. В практике скважинных исследований инструменты постоянного мониторинга обычно располагаются на расстоянии около 100 метров выше перфорированной (продуктивной) зоны [3]. Это несоответствие приводит к необходимости определения зоны влияния температурного сигнала пласта для определения оптимальной величины расположения датчика температуры.

Искомая зона определяется на основе асимптотического решения о нестационарном теплообмене в стволе скважины. Постановка

задачи в предположении осевой симметрии включает уравнение теплопроводности в окружающем трубу массиве, уравнение конвективной теплопроводности в скважине [4].

На границе трубы и окружающей среды заданы условия равенства температур и тепловых потоков. Начальные условия соответствуют естественной невозмущенной температуре Земли, возрастающей по линейному закону с глубиной z_d , которая совпадает с температурой в удаленных от трубы точках окружающего массива. В точке $z_d = 0$ температура потока задана известной зависимостью. На искомое решение накладывается также условие симметрии, заключающееся в том, что производная по радиальной координате на оси z_d цилиндрической системы координат в центре скважины обращается в нуль.

Исходная задача приводится к безразмерному виду, позволяющему вводить критериальные числа, характеризующие протекающие процессы. В безразмерную постановку формально вводится параметр асимптотического разложения ε путем замены параметра Λ на его произведение с формальным асимптотическим параметром $\varepsilon\Lambda$. При $\varepsilon = 1$ задача сводится к исходной. Такое введение формального параметра в задаче имеет физический смысл, заключающийся в том, что устремление его к нулю $\varepsilon \rightarrow 0$ соответствует возрастанию радиальной компоненты теплопроводности флюида до бесконечности $\lambda_r \rightarrow \infty$. Кроме того, формальное определение параметра разложения позволяет разделить его математический и физический смысл.

Общая параметризованная задача разбита на задачи для коэффициентов асимптотического разложения, которые являются «зацепленными», так как содержат коэффициенты разложения более высоких порядков. Эта проблема решена с использованием специально разработанной процедуры расцепления. Решение «расцепленных» задач для коэффициентов разложения найдено с использованием интегральных преобразований Лапласа – Карсона. Обратный переход выполнен при помощи таблиц [5].

Представленные на рис.1 расчеты выполнены для осредненной по сечению температуры в приближении малых времен соответственно. Для расчета размерных кривых использованы следующие значения параметров скважины: $D = 2000$ м, $r_0 = 0.1$ м; наполняющего флюида: нефть $\lambda_n = 0.15$ Вт/(м·К), $\eta_n = 0.0137$ К/атм, $c_n = 2000$ Дж/(К·кг), $\rho_n = 800$ кг/м³; окружающей среды:

$\lambda = 2 \text{ Вт/(м·К)}$, $c = 840 \text{ Дж/(К·кг)}$, $\rho = 2400 \text{ Дж/(К·кг)}$, $\Gamma = 0.03 \text{ К/м}$.
 При расчете безразмерных кривых использовались следующие безразмерные величины: $Pe \cdot \nu = 0.1$, $H = 0.1$, $A = 1$, $\chi = 1.3$ (нефть).

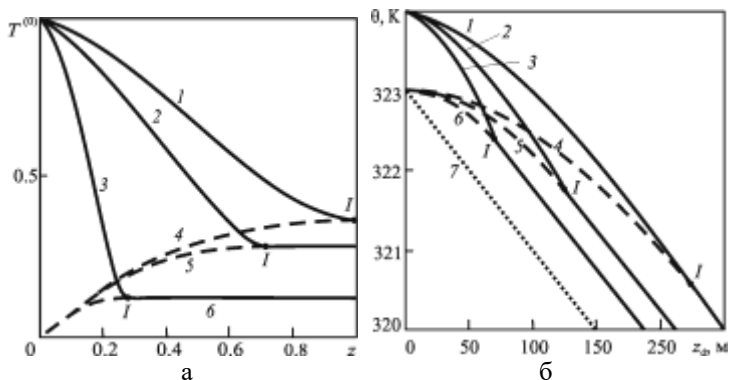


Рис. 1. Зависимость температуры в скважине для потока нефти от вертикальной координаты в зоне влияния температурных сигналов пласта при различных временах в безразмерном (а) и размерном (б) виде: 3, 6 – $Fo = 0.3$, 2, 5 – 1, 1, 4 – 1.5 (а); 1, 4 – $\tau = 8$ ч, 2, 5 – 4 ч, 3, 6 – 2 ч, 7 – естественная невозмущенная температура Земли (б).

Штриховые кривые соответствуют нулевому температурному сигналу, *сплошные* – единичному. *I* – верхняя граница зоны влияния температурного сигнала пласта

Рисунок 1 иллюстрирует зависимость относительной температуры потока нефти в скважине от вертикальной координаты в зоне влияния температурных сигналов пласта при различных временах в безразмерном (а) и размерном (б) виде. Штриховые кривые соответствуют нулевому температурному сигналу. ($T_0 = 0$, $\theta_0 = \theta_{10} - \theta_{01} = 0 \text{ K}$), сплошные – температурному сигналу, сопоставимому по величине с геотермическим перепадом температуры ($T_0 = 1$, $\theta_0 = 1 \text{ K}$) в интервале исследований.

Анализ кривых показывает, что наряду с зоной конвективного влияния (ЗКВ) пласта, верхняя граница которой определяется соотношением $Z = Pe \cdot \nu \cdot Fo$ ($Z_d = \nu \cdot \tau$) существует зона влияния температурных сигналов пласта (ЗВТСП), размеры которой меньше зоны конвективного влияния. Точка *I* соответствует верхней границей ЗВТСП

Z_T . Эта точка является границей двух зон: зоны стабилизации теплообмена $0 < z < Z$ и зоны постоянных градиентов $Z < z < D$. Из рисунка следует, что положение этой границы смещается вверх с увеличением времени (ср. кр. 1, 2, 3).

Таким образом, при выбранных расчетных параметрах, скважинный термометр целесообразно располагать на расстоянии 50 – 75 метров от интервала перфорации, где информация об изменении температурного поля в пласте может быть уверенно зафиксирована современной измерительной аппаратурой уже через 2 ч после начала отбора. Потери температурного сигнала в этом диапазоне не превышают 30 %. На расстоянии 150 метров сигнал может быть зафиксирован через 8 часов, при этом его амплитуда уменьшается на 70%.

Список обозначений

c – удельная теплоемкость, Дж/(К·кг); D – глубина скважины, м; F_0 – безразмерное время; Pe – аналог параметра Пекле; r_0 – внутренний радиус скважины, м; r – радиальная координата цилиндрической системы координат, м; t – размерное время, с; T – безразмерное температурное поле; z_d, z – соответственно размерная и безразмерная вертикальная координата, м; Γ – геотермический градиент, К/м; θ – температура, К; ε – параметр асимптотического разложения; η – адиабатический коэффициент, К/Па; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); A – безразмерный параметр; ρ – плотность, кг/м³; τ – безразмерное время; χ – отношение объемных теплоемкостей.

Библиографический список

1. Валиуллин Р.А. и др. Исследование температурных полей в пластах с трещиной гидроразрыва // SPE-187748-RU, 2017.
2. Афанасьев В.С., Ланцов А.Ю. Моделирование температуры в стволе скважины и методика решения обратной задачи // Каротажник. 2014. № 12 (246). С. 43–60.
3. Duru O., Horne R. Modeling reservoir temperature transients and matching to permanent downhole gauge data for reservoir parameter estimation // SPE 115791, 2008.
4. Филиппов А.И., Ахметова О.В. Температурное поле в пласте и скважине, – Уфа: АН РБ, Гилем, 2011. – 336 с.
5. Диткин В.А., Прудников А.П. Справочник по операционному исчислению, – М.: Высшая школа, 1965. – 466 с.

Сведения об авторах

Ахметова Оксана Валентиновна, доктор физико-математических наук, профессор СФ БашГУ. E-mail: ahoksana@yandex.ru.

Ридзель Сергей Александрович, магистрант СФ БашГУ. E-mail: sergei.ridzel@mail.ru.

УДК 544.034

**Балапанов М.Х., Ишембетов Р.Х., Кубенова М.М.,
Кутербеков К.А., Палымбетов Р.Ш., Баишева А.Х., Якшибаев Р.А.
ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СУЛЬФИДОВ МЕДИ $K_xCu_{1.85}S$
($0 < x < 0.05$)**

Синтезированы нанокристаллические полупроводниковые сульфиды меди, легированные калием. Рентгенофазовый анализ при комнатной температуре показал, что образцы представляют собой смесь различных фаз сульфида меди. Представлены результаты ДСК калориметрии, измерения электронной проводимости и коэффициента электронной термо - э.д.с.

Ключевые слова: рентгенофазовый анализ, сульфид меди, фазовые переходы, термоэлектрик, проводимость.

**Balapanov M.Kh., Ishembetov R.Kh., Kubenova M.M.,
Kuterbekov K.A., Palymbetov R.Sh., Baisheva A.Kh.,
Yakshibaev R.A.**

**PHASE COMPOSITION AND ELECTROPHYSICAL
PROPERTIES OF NANOCRYSTALLINE COPPER SULFIDES
 $K_xCu_{1.85}S$ ($0 < x < 0.05$)**

Potassium-doped nanocrystalline semiconductor copper sulfides have been synthesized. X-ray phase analysis at room temperature showed that the samples are a mixture of different phases of copper sulfide. The results of DSC calorimetry, measurements of electronic conductivity and coefficient of electronic thermo - emf are presented.

Key words: X-ray phase analysis, copper sulfide, phase transitions, thermoelectric, conductivity.

Введение.

Сульфиды меди и их сплавы с щелочными металлами представляют собой перспективные термоэлектрические материалы [1, 2]. В основном, исследованы бинарные составы и их сплавы с небольшим содержанием лития и натрия. Работ по физическим свойствам калий-содержащих сульфидов меди в литературе немного. Согласно работе Т. Ohtani et al. [3] в квазибинарных системах с тяжелыми щелочными катионами (типа $\text{Cu}_2\text{S-K}_2\text{S}$, $\text{Cu}_2\text{S-Rb}_2\text{S}$, $\text{Cu}_2\text{S-Tl}_2\text{S}$) образуются несоразмерные квазидномерные структуры с общей формулой ACu_7S_4 ($A = \text{Tl, K, Rb}$). В работе Ли [4] сообщается о нанопроволоках $\text{KCu}_{7-x}\text{S}_4$, демонстрирующих повышенные термоэлектрические свойства по сравнению с бинарными нанокристаллами Cu_7S_4 . Наличие ионов K^+ формирует клатрат и структуру суперионной жидкости, которая обеспечивает состояние «фононного стекла» и «жидко-электронного кристалла». Низкая теплопроводность (менее $0.5 \text{ Вт м}^{-1}\text{К}^{-1}$ в интервале 325 - 575 К) и большой коэффициент термо-э.д.с. ($0.1 \div 0.19 \text{ мВ/К}$ в интервале 425-575 К) наблюдались при прессовании нанопроволок в объемный материал. Полученные для спрессованных пластин из нанопроволок $\text{KCu}_{7-x}\text{S}_4$ в работе [4] пиковые значения термоэлектрической добротности $ZT \approx 0.12$ при 350 К, $ZT \approx 0.19$ при 575 К.

В работе [5] представлены результаты фазового анализа, и экспериментальных исследований электронной проводимости и термо-э.д.с., коэффициента теплопроводности образцов сплава $\text{K}_{0.2}\text{Cu}_{1.8}\text{S}$ в интервале температур от 30 до 400 °С. По результатам рентгенофазового анализа сплав представляет собой смесь различных фаз сульфида меди: кубической Fm-3m фазы $\text{Cu}_{1.84}\text{S}$, кубической Fm-3m фазы Cu_2S , ромбоэдрической R-3m фазы Cu_{17}S_9 и метастабильной тетрагональной P4_32_12 фазы Cu_2S . Дифференциальная сканирующая термометрия показала эндотермический пик, растянутый от 84 до 102 °С, вызванный фазовыми переходами из ромбоэдрической и тетрагональной фаз в гексагональную фазу сульфида меди. Выше 300 °С наблюдались сильный рост коэффициента термо-э.д.с. (до 4 мВ/К) и снижение теплопроводности до $0.4 \text{ Вт/м}^2\text{К}$, приводящие к очень высокому пиковому значению безразмерной термоэлектрической эффективности $ZT=3.5$ при 380 °С.

В данной работе впервые синтезированы и изучены полупроводниковые сплавы $K_xCu_{1.85}S$ ($x = 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05$).

Методика эксперимента

Полупроводниковые сплавы $K_xCu_{1.85}S$ ($x = 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05$) были синтезированы в расплаве смеси гидрооксидов NaOH и KOH при температуре около 165 °С. Все реагенты ($CuCl$, KCl , $Na_2S \cdot 9H_2O$) закладывались в нагретый тефлоновый сосуд одновременно. Наноструктура формировалась в течение 16 часов. Полученный продукт промывали дистиллированной нагретой водой, затем чистым этанолом, и сушили при 60 °С. Фазовый состав образцов исследовали с помощью рентгеновской дифрактометрии при комнатной температуре; дополнительно были проведены исследования фазовых переходов методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК). Химический состав определяли по соотношению заложенных при синтезе реагентов и контролировали с помощью рентгенофлюоресцентного анализа.

Измерение рентгеновской дифракции производилось с помощью рентгеновского дифрактометра SmartLab производства Rigaku Corporation. Использовалось $Cu K_\alpha$ - излучение (1.54059 Å). Использовался одномерный детектор (D/teX Ultra, Rigaku) с фильтром K_β , и измерения проводились методом пошагового сканирования в диапазоне углов измерения $2\theta = 10\text{--}80^\circ$, с шагом $(\Delta 2\theta) = 0.05^\circ$ при скорости сканирования = 2 °/ мин. Для идентификации фаз и исследования кристаллической структуры использовались программное обеспечение PDXL: INTEGRATED X-RAY POWDER DIFFRACTION SOFTWARE и международная база данных ICDD PDF-2. Определение размера кристаллитов производилось по формуле Шерера:

$$D_{hkl} = \frac{K\lambda}{\beta_{hkl} \cos(\theta_{hkl})},$$

где h, k, l – индексы Миллера,

D_{hkl} – средний размер кристаллита,

K – коэффициент Шерера,

λ – длина волны рентгеновского излучения,

$2\theta_{hkl}$ – положение дифракционного рефлекса (hkl),

β_{hkl} – ширина на половине высоты дифракционного рефлекса (hkl).

Фазовые переходы исследовались с помощью дифференциальной сканирующей калориметрии на ДСК-калориметре DSC404 NETZSCH при скорости нагрева 10 град/мин в атмосфере аргона.

Электрическая проводимость и термо-эдс измерялись на постоянном токе четырехзондовым методом на экспериментальной установке ULVAC ZEM-3 (Япония).

Экспериментальные результаты

На рисунке 1 представлены рентгеновские спектры образцов.

Согласно результатам рентгенофазового анализа образцы $K_xCu_{1.85}S$ при комнатной температуре представляют собой смесь фаз моноклинного джарлеита ($Cu_{1.9375}S$), моноклинного и гексагонального халькоцита (Cu_2S). Вычисленные из полуширины рентгеновских линий размеры кристаллитов лежат в интервале от 20 до 200 нм.

На рисунке 2 представлены ДСК кривые всех пяти образцов $K_xCu_{1.85}S$ ($x = 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05$). Термический эффект около 370 К выражен достаточно слабо, но присутствует у всех образцов. Для образца $x = 0.04$, наблюдаются сильный эндотермический пик при 465.5 К и значительный пик при 643.7 К. Для всех образцов есть эндотермический тепловой эффект вблизи 670-700 К.

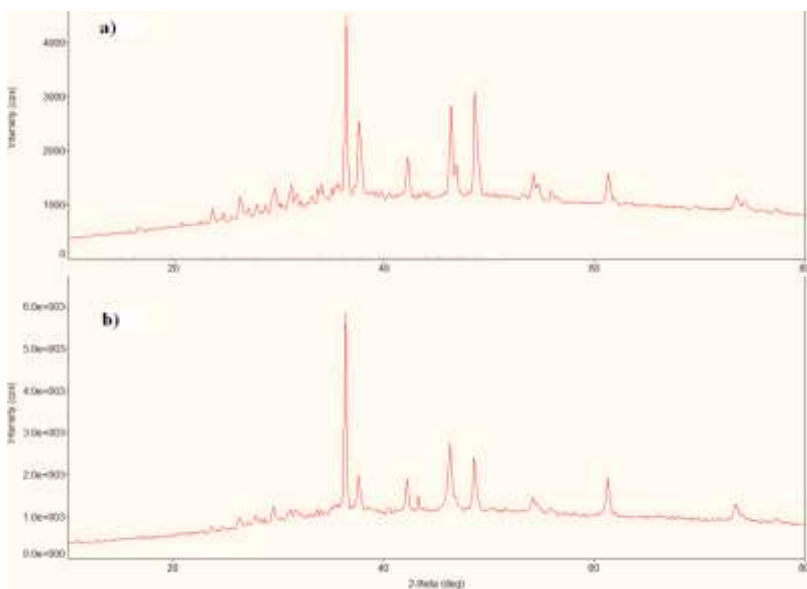


Рис. 1. Рентгеновские спектры образцов $K_{0.01}Cu_{1.85}S$ (а) и $K_{0.04}Cu_{1.85}S$ (б)

Электронная проводимость исследуемых сплавов лежит в интервале от сотен См/см до до сотых долей См/см. В области фазовых переходов отмечаются аномалии. Для примера на рис.3. представлена температурная зависимость электронной проводимости сплава $K_{0.04}Cu_{1.85}S$ в логарифмических координатах.

Сильный тепловой эффект, растянувшийся от 450 до 500 К на кривой ДСК (рис.2, кривая 1), примерно соответствует резкому падению проводимости на рис. 3, происходящему в области от 450 до 550 К. Другому тепловому эффекту, занимающему область 630-660 К на кривой ДСК, соответствует локальный максимум проводимости около 630 К на рис.3.

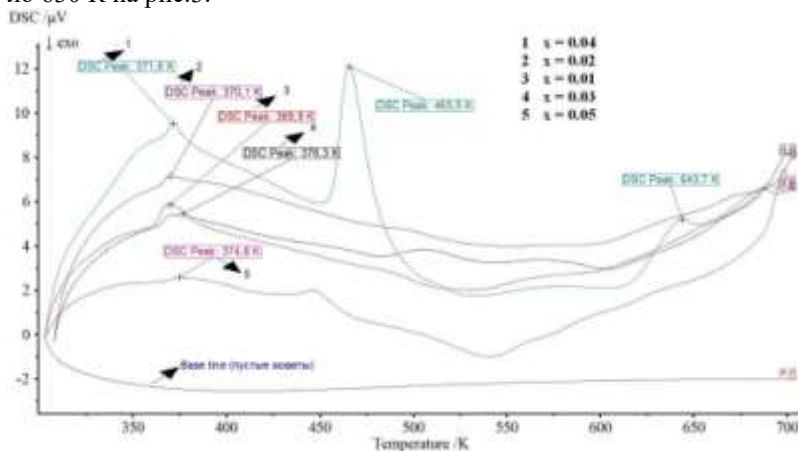


Рис. 2. ДСК - кривые образцов $K_xCu_{1.85}S$ ($x = 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05$)

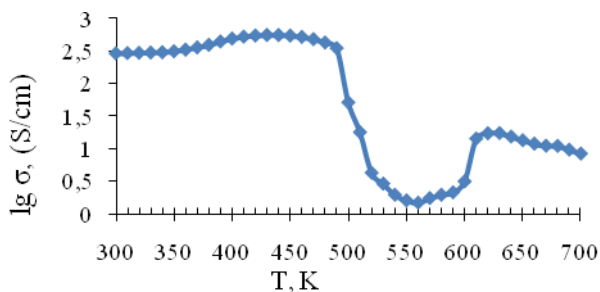


Рис. 3 Температурная зависимость электронной проводимости $K_{0.04}Cu_{1.85}S$

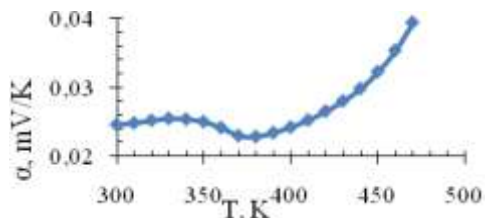


Рис. 4. Температурная зависимость коэффициента электронной термо-э.д.с. $K_{0.04}Cu_{1.85}S$.

Энергия активации проводимости $K_{0.04}Cu_{1.85}S$ в области 360-400 К составила 0.15 ± 0.01 эВ, что удовлетворительно согласуется со значением 0.20 ± 0.02 эВ для сплава $K_{0.2}Cu_{1.8}S$ [5].

Температурная зависимость коэффициента электронной термо-э.д.с. $K_{0.04}Cu_{1.85}S$ представлена на рис.4. Низкие значения коэффициента термо-э.д.с. в области до 400 К можно объяснить высокой проводимостью сплава (300 – 500 См/см). Наблюдающийся минимум на температурной зависимости коэффициента термо-э.д.с. примерно около 375 К соответствует тепловому эффекту на кривой ДСК (371.6 К).

Библиографический список

1. Kubenova M.M., Kuterbekov K.A., Balapanov M.Kh., Ishembetov R.Kh., Kabyshev A.M., Bekmyrza K.Zh. Some Thermoelectric Phenomena in Copper Chalcogenides Replaced by Lithium and Sodium Alkaline Metals // *Nanomaterials* 2021. V.11. P. 2238–2286.
2. Qiu, P.; Zhu, Y.; Qin, Y.; Shi, X.; Chen, L. Electrical and thermal transports of binary copper sulfides Cu_xS with x from 1.8 to 1.96. // *APL Mater.* 2016. V.4, 104805, doi:10.1063/1.4953439.
3. Ohtani T., Ogura J., Yoshihara H. and Yokota Y. Physical Properties and Successive Phase Transitions in Quasi-One-Dimensional Sulfides ACu_7S_4 (A = Tl, K, Rb) // *J. Solid State Chem.* 1995, V.115. P. 379–389.
4. Li, X., Hu C., Kang X., Len Q., Xi Y., Zhang K. and Liu H. Introducing kalium into copper sulfide for the enhancement of thermoelectric properties // *J. Mater. Chem. A*. 2013. V.1. P. 13721–13726.
5. Балапанов М.Х., Ишембетов Р.Х., Ахметгалиев Б.М., Кутербеков К.А., Палымбетов Р.Ш., Сахабаева С., Якшибаев Р.А. Явления переноса в суперионном сплаве $K_{0.2}Cu_{1.8}S$. // *Вестник Башкирского университета*. 2020. Т. 25, № 4. С. 794-799.

Сведения об авторах

Балапанов Малик Хамитович, доктор физико-математических наук, профессор БашГУ (г. Уфа). E-mail: BalapanovMK@mail.ru.

Ишембетов Раис Хурматуллович, кандидат физико-математических наук, доцент БашГУ (г. Уфа). E-mail: Rishem@mail.ru.

Кубенова Маржан Маликовна, доктор философии (PhD), заведующий лабораторией Евразийского национального университета им. Л.Н. Гумилева (г. Нур-Султан). E-mail: kubenova.m@yandex.kz.

Кутербеков Кайрат Атажанович, доктор физико-математических наук, профессор Евразийского национального университета им. Л.Н. Гумилева (г. Нур-Султан). E-mail: kkuterbekov@gmail.com.

Палымбетов Руслан Шаменович, аспирант PhD Евразийского национального университета им. Л.Н. Гумилева (г. Нур-Султан). E-mail: ruslan.palimbet@mail.ru.

Баишева Алия Хазинуровна, аспирант БашГУ (г. Уфа). E-mail: aliya-baisheva@yandex.ru.

Якшибаев Роберт Асгатович, доктор физико-математических наук, профессор БашГУ (г. Уфа). E-mail: yakshibaevra@mail.ru.

УДК 544.034

Балапанов М.Х., Ишембетов Р.Х., Кубенова М.М., Кутербеков К.А., Сахабаева С.М., Ахметгалиев Б.М., Якшибаев Р.А.

ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СУЛЬФИДОВ МЕДИ $K_xCu_{1.97-x}S$ ($0 < x < 0.05$)

Синтезированы нанокристаллические полупроводниковые сульфиды меди, легированные калием. Рентгенофазовый анализ при комнатной температуре показал, что образцы представляют собой смесь различных фаз сульфида меди. Представлены результаты ДСК калориметрии и температурные зависимости коэффициента электронной терм - э.д.с. в области 300–700 К.

Ключевые слова: рентгенофазовый анализ, сульфид меди, фазовые переходы, термоэлектрик, проводимость.

**Balapanov M.Kh., Ishembetov R.Kh., Kubenova M.M.,
Kuterbekov K.A., Sakhabaeva S.M., Akhmetgaliev B.M., Yakshibaev R.A.**

**PHASE COMPOSITION AND THERMOELECTRICAL
PROPERTIES OF NANOCRYSTALLINE $K_xCu_{1.97-x}S$ ($0 < x < 0.05$)
COPPER SULFIDES**

Potassium-doped nanocrystalline semiconductor copper sulfides have been synthesized. X-ray phase analysis at room temperature showed that the samples are a mixture of different phases of copper sulfide. The results of DSC calorimetry and temperature dependences of Seebeck coefficient are presented in the range of 300 - 700 K.

Key words: X-ray phase analysis, copper sulfide, phase transitions, thermoelectric, conductivity.

Введение.

Сульфиды меди и их сплавы с щелочными металлами представляют собой перспективные термоэлектрические материалы [1,2]. В основном, исследованы бинарные сульфиды и их сплавы с небольшим содержанием лития и натрия [3]. Работ по физическим свойствам калийсодержащих сульфидов меди в литературе немного. В работе Ли [4] сообщается о нанопроволоках $KCu_{7-x}S_4$, демонстрирующих повышенные термоэлектрические свойства по сравнению с бинарными нанокристаллами Cu_7S_4 . Наличие ионов K^+ формирует клатрат и структуру суперионной жидкости, которая обеспечивает состояние «фононного стекла» и «жидко-электронного кристалла». Низкая теплопроводность (менее $0.5 \text{ Вт м}^{-1}\text{К}^{-1}$ в интервале 325 - 575 K) и большой коэффициент термо-э.д.с. ($0.1 \div 0.19 \text{ мВ/К}$ в интервале 425-575 K) наблюдались при прессовании нанопроволок в объемный материал. Полученные для спрессованных пластин из нанопроволок $KCu_{7-x}S_4$ в работе [4] пиковые значения термоэлектрической добротности невелики и не представляют практического интереса ($ZT \approx 0.12$ при 350 K, $ZT \approx 0.19$ при 575 K). Более перспективными выглядят объемные поликристаллические материалы на основе сульфида меди. В работе [5] представлены результаты исследований сплава $K_{0.2}Cu_{1.8}S$ в интервале температур от 30 до 400 °C. По результатам рентгенофазового анализа сплав представляет собой смесь различных фаз сульфида меди:

кубической Fm-3m фазы $\text{Cu}_{1.84}\text{S}$, кубической Fm-3m фазы Cu_2S , ромбоэдрической R-3m фазы Cu_{17}S_9 и метастабильной тетрагональной P4_32_12 фазы Cu_2S . Дифференциальная сканирующая термометрия (ДСК) показала эндотермический пик, растянутый от 84 до 102 °С, вызванный фазовыми переходами из ромбоэдрической и тетрагональной фаз в гексагональную фазу сульфида меди. Выше 300 °С наблюдались сильный рост коэффициента термо-э.д.с. (до 4 мВ/К) и снижение теплопроводности до 0.4 Вт/м·К, приводящие к очень высокому пиковому значению безразмерной термоэлектрической эффективности $ZT=3.5$ при 380 °С.

В данной работе впервые синтезированы и изучены полупроводниковые сплавы с небольшим содержанием калия - $\text{K}_x\text{Cu}_{1.97-x}\text{S}$ ($x = 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05$). Идея работы состоит в том, чтобы изучить влияние легирования калием на сульфид меди в фазе $\text{Cu}_{1.97-x}\text{S}$ (джарлент).

Методика эксперимента

Полупроводниковые сплавы $\text{K}_x\text{Cu}_{1.97-x}\text{S}$ ($x = 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05$) были синтезированы в расплаве смеси гидрооксидов NaOH и KOH при температуре около 165 °С. Все реагенты (CuCl , KCl , $\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) закладывались в нагретый тефлоновый сосуд одновременно. Наноструктура формировалась примерно в течение 16 часов. Полученный продукт промывали дистиллированной нагретой водой, затем чистым этанолом, и сушили при 60 °С. Фазовый состав образцов исследовали с помощью рентгеновской дифрактометрии при комнатной температуре; также были проведены исследования фазовых переходов методом ДСК. Химический состав определяли по соотношению заложенных при синтезе реагентов и контролировали с помощью рентгенофлюоресцентного анализа.

Измерение рентгеновской дифракции производилось с помощью рентгеновского дифрактометра SmartLab производства Rigaku Corporation. Использовалось Cu K_α - излучение (1.54059 Å). Для идентификации фаз и исследования кристаллической структуры использовались программное обеспечение PDXL: INTEGRATED X-RAY POWDER DIFFRACTION SOFTWARE и международная база данных ICDD PDF-2. Определение размера кристаллитов производилось по формуле Шерера:

$$D_{hkl} = \frac{K\lambda}{\beta_{hkl} \cos(\theta_{hkl})},$$

где h, k, l – индексы Миллера,

D_{hkl} – средний размер кристаллита,

K – коэффициент Шерера,

λ – длина волны рентгеновского излучения,

$2\theta_{hkl}$ – положение дифракционного рефлекса (hkl),

β_{hkl} – ширина на половине высоты дифракционного рефлекса (hkl).

Фазовые переходы исследовались с помощью дифференциальной сканирующей калориметрии на ДСК-калориметре DSC404 NETZSCH при скорости нагрева 10 град/мин в атмосфере аргона. Электрическая проводимость и термо-эдс измерялись на постоянном токе четырехзондовым методом на экспериментальной установке ULVAC ZEM-3 (Япония).

Экспериментальные результаты

На рисунке 1 представлены рентгеновские спектры образцов $K_{0.01}Cu_{1.96}S$ (а) и $K_{0.05}Cu_{1.94}S$ (б).

Согласно результатам рентгенофазового анализа образцы $K_xCu_{1.97-x}S$ при комнатной температуре представляют собой смесь различных фаз сульфида меди. Так, в состав $K_{0.01}Cu_{1.96}S$ входят фазы $Cu_{1.97}S$ (моноклинный джарлеит), Cu_2S (моноклинный халькоцит), имеются следы кубической фазы оксида Cu_2O (пространственная группа $Rn3m$). Сплав $K_{0.05}Cu_{1.94}S$ состоит из тетрагонального джарлеита $Cu_{1.96}S$ и моноклинного халькоцита (Cu_2S). Вычисленные из полуширины рентгеновских линий размеры кристаллитов лежат в интервале от 10 - 64 нм у $K_{0.01}Cu_{1.96}S$, 7 - 47 нм у $K_{0.05}Cu_{1.94}S$.

На рисунке 2 представлены ДСК кривые всех пяти образцов $K_xCu_{1.97-x}S$ ($x = 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05$) в сравнении с чистым Cu_2S .

Сильный термический эффект около 378 К присутствует у всех образцов, что соответствует высокому содержанию фазы моноклинного халькоцита в сплавах (фазовый переход в гексагональную фазу в бинарном Cu_2S происходит при 376 К по литературным данным [6]). Обращает на себя внимание факт, что у сплава с меньшим содержанием калия $K_{0.01}Cu_{1.96}S$ этот эффект сдвинут на 10 градусов выше.

Для образца $K_{0.03}Cu_{1.94}S$ фазовый переход наблюдается раньше чем в бинарном Cu_2S на 12 градусов, также для этого состава имеется небольшая аномалия около 423 К. Для состава $K_{0.02}Cu_{1.95}S$ отмечен пик около 463 К.

На кривых ДСК всех сплавов имеется также эндотермический тепловой эффект в интервале 722 – 743 К. Для бинарного Cu_2S тепловой пик соответствует 737 К на рис.2, по литературным данным он происходит при 710 К согласно последним данным [6], но есть также данные Хирахара о температуре перехода ≈ 740 К [7]. Возможно

также, что на температуру перехода в наших измерениях повлияла нанокристалличность материала.

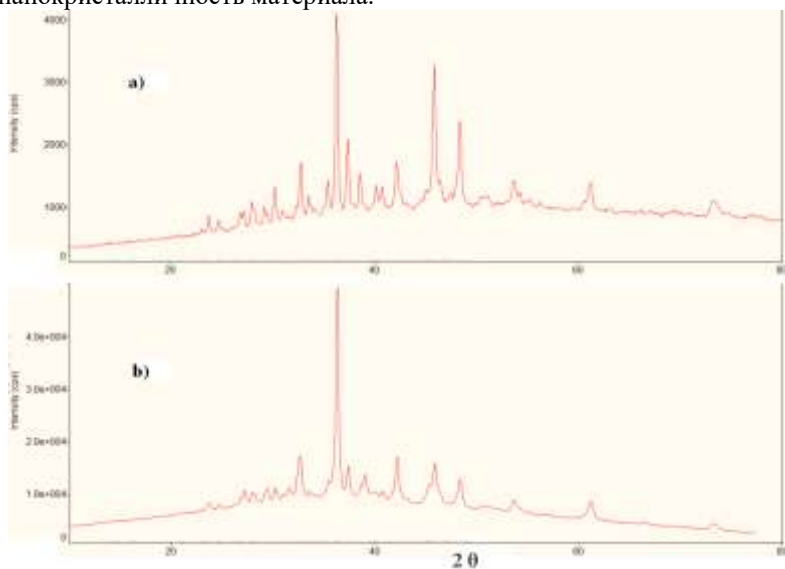


Рис. 1. Рентгеновские спектры образцов $K_{0.01}Cu_{1.96}S$ (а) и $K_{0.05}Cu_{1.94}S$ (б)

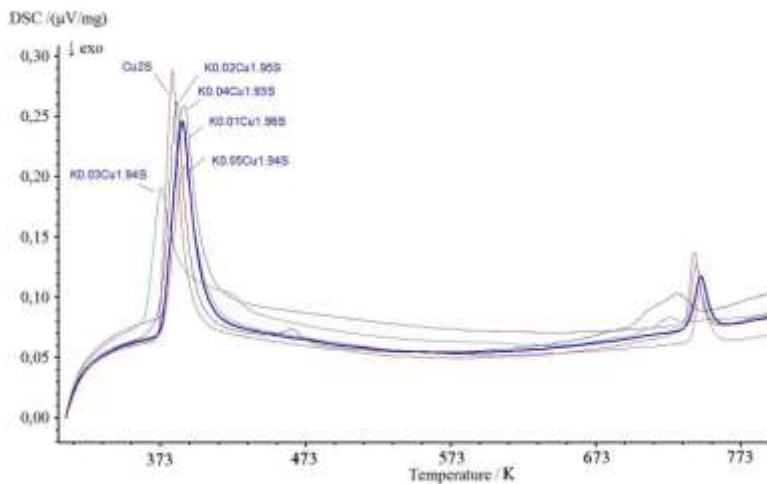


Рис. 2. ДСК - кривые образцов $K_xCu_{1.97-x}S$

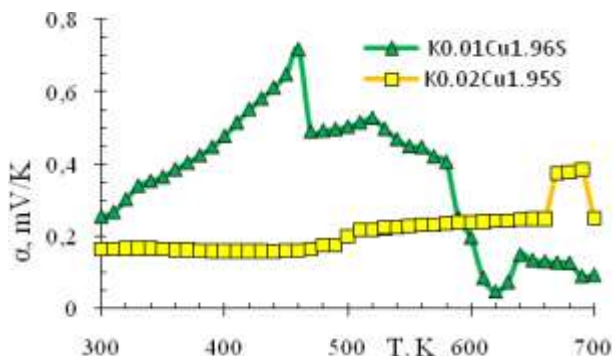


Рис. 3. Температурные зависимости коэффициента электронной термо-э.д.с.

На рисунке 3 приведены температурные зависимости коэффициента электронной термо-э.д.с. сплавов. Наблюдаются высокие значения коэффициента термо-э.д.с. от 0.17 до 0.72 мВ/К в области температур от 300 до 470 К, что важно для возможных термоэлектрических приложений.

На рис.3 отмечаются аномалии, которые, однако, не связаны с тепловыми эффектами на кривых ДСК. Во-первых, фазовый переход из моноклинной в гексагональную фазу в халькопите не отразился на ходе температурной зависимости коэффициента термо-э.д.с. Во-вторых, аномалии на рис. 3 при 580 – 640 К в $K_{0.01}Cu_{1.96}S$ и при 660 – 690 К в $K_{0.02}Cu_{1.95}S$ происходят значительно раньше фазового перехода из гексагональной фазы в кубическую, который отразился на кривых ДСК в интервале 722 – 743 К. Для ответа на эти и другие вопросы необходимо проведение высокотемпературного рентгенофазового анализа и детальное исследование электронного переноса в этих сплавах.

Библиографический список

1. Mao J., Liu Z., Zhou J., Zhu H., Zhang Q., Chen G., Ren Z. Advances in thermoelectrics // Adv. Phys. 2018. V.67. P. 69–147.
2. Qiu P., Zhu Y., Qin Y., Shi X., Chen L. Electrical and thermal transports of binary copper sulfides Cu_xS with x from 1.8 to 1.96 // APL Mater. 2016. V.4, 104805, doi:10.1063/1.4953439.
3. Kubenova M.M., Kuterbekov K.A., Balapanov M.Kh., Ishembetov R.Kh., Kabyshev A.M., Bekmyrza K.Zh. Some Thermoelectric Phenome-

na in Copper Chalcogenides Replaced by Lithium and Sodium Alkaline Metals. // *Nanomaterials* 2021. V.11. P.2238 – 2286.

4. Li. X., Hu C., Kang X., Len Q., Xi Y., Zhang K. and Liu H. Introducing kalium into copper sulfide for the enhancement of thermoelectric properties // *J. Mater. Chem. A*. 2013. V.1. P. 13721- 13726.

5. Балапанов М.Х., Ишембетов Р.Х., Ахметгалиев Б.М., Кутербеков К.А., Палымбетов Р.Ш., Сахабаева С., Якшибаев Р.А. Явления переноса в суперионном сплаве $K_{0.2}Cu_{1.8}S$ // *Вестник Башкирского университета*. 2020. Т. 25, № 4. С. 794-799.

6. Grønvold F., Westrum E.F. Thermodynamics of copper sulfides I. Heat capacity and thermodynamic properties of copper(I) sulfide, Cu_2S , from 5 to 950 K. // *J. Chem. Thermodyn.* 1987. V. 19. P. 1183–1198.

7. Hirahara E. The physical properties of cuprous sulfides - semiconductors // *J. Phys. Soc. Japan*. 1951. V.6. P. 422-427.

Сведения об авторах

Балапанов Малик Хамитович, доктор физико-математических наук, профессор БашГУ (г. Уфа). E-mail: BalapanovMK@mail.ru.

Ишембетов Раис Хурматуллович, кандидат физико-математических наук, доцент БашГУ (г. Уфа). E-mail: Rishem@mail.ru.

Кубенова Маржан Маликовна, доктор философии (PhD), заведующий лабораторией Евразийского национального университета им. Л.Н. Гумилева (г. Нур-Султан). E-mail: kubenova.m@yandex.kz.

Кутербеков Кайрат Атажанович, доктор физико-математических наук, профессор Евразийского национального университета им. Л.Н. Гумилева (г. Нур-Султан). E-mail: kkuterbekov@gmail.com.

Сахабаева Сайра Максутхановна, аспирант PhD Евразийского национального университета им. Л.Н. Гумилева (г. Нур-Султан). E-mail: saira.enu@mail.ru.

Ахметгалиев Булат Мухаматхарасович, ассистент БашГУ (г. Уфа). E-mail: baxmetgaliev@mail.ru.

Якшибаев Роберт Асгатович, доктор физико-математических наук, профессор БашГУ (г. Уфа). E-mail: yakshibaevra@mail.ru.

УДК 538.913

Биккулова Н.Н., Якшибаев Р.А., Акманова Г.Р., Сафаргалиев Д.И.
КОМПЬЮТЕРНЫЙ ДИЗАЙН ФАЗ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ
СИСТЕМЫ Cu-Se

В работе приведены результаты компьютерного дизайна фаз высокого давления системы Cu-Se.

Ключевые слова: суперионные проводники, фазовая диаграмма, параметры ячейки, высокое давление.

Bikkulova N.N., Yakshibaev R.A., Akmanova G.R., Safargaliev D.I.
COMPUTER DESIGN OF THE HIGH PRESSURE PHASES OF
THE Cu-Se SYSTEM

The paper presents the results of computer design of the high-pressure phases of the Cu-Se system.

Key words: superionic conductors, phase diagram, cell parameters, high pressure.

Фазовые диаграммы являются основными инструментами в физике твердого тела и материаловедении. Фазовые диаграммы многих сплавов и некоторых соединений изучены досконально и хорошо известны. Однако имеются ограниченные данные о фазовых диаграммах халькогенидов меди и серебра. Это связано с тем, что данная область исследований является относительно новой и построение новых фазовых диаграмм затруднено. Фазовая диаграмма – это графическое описание составов и относительных количеств фаз в зависимости от химического состава и от внешних условий. В качестве внешних условий может выступать: температура, давление, напряженность магнитного поля, гравитация, химический потенциал вполне подвижного компонента и т.д. В данной работе рассматривается фазовая диаграмма, где в качестве внешнего условия выступает давление.

Атомная структура – самая важная часть информации о кристаллической решетке твердых тел: по знанию топологии структуры, точной геометрической модели и многих других физических свойств кристалла может быть найдено его основное энергетическое состояние с помощью квантово-механических методов. В то же время, предсказание инструментами только теоретической физики похожих

структурных топологий, структурных типов, представляет собой трудно решаемую проблему. В большинстве случаев бывает сложно определить кристаллическую структуру нанокристаллов из экспериментально полученных данных, однако, умение предсказывать теоретическую структуру критически важно по следующим причинам:

- при недостаточном количестве и качестве экспериментальных данных для дефектных или маленьких образцов, особенно под высокими давлениями и температурой, не всегда удается получить однозначные и объективные данные о структуре;

- в случае, если теория является единственным способом исследования материала при условиях, которые не могут быть исследованы с существующими технологиями;

- способность предсказывать новые кристаллические структуры открывает новые пути дизайна материалов.

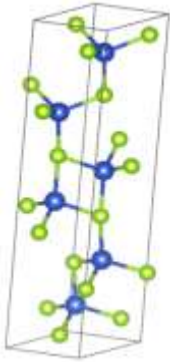
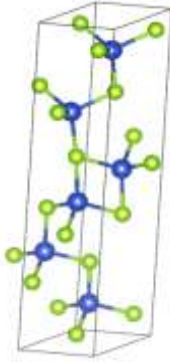
В данной работе проведены модельные компьютерные расчеты фазовой диаграмм системы Cu-Se с помощью программы USPEX [1], уточнены структуры селенидов меди стехиометрических и нестехиометрических составов. Суть поиска наиболее устойчивой структуры сводится к вычислению такого состояния вещества, которое обладает наименьшей энергией. Энергия в данном случае зависит от электромагнитного взаимодействия ядер и электронов атомов, из которых состоит исследуемый кристалл. Ее можно оценить с помощью квантово-механических расчетов, основанных на упрощенном уравнении Шредингера. Так в алгоритме USPEX используется теория функционала плотности, которая получила развитие во второй половине прошлого века. Ее основная цель заключается в упрощении расчетов электронной структуры молекул и кристаллов. Теория позволяет заменить многоэлектронную волновую функцию электронной плотностью, при этом оставаясь формально точной (но на самом деле приближения оказываются неизбежными) [1-8]. На практике это приводит к уменьшению сложности вычислений и, как следствие, времени, которое на них будет затрачено. Таким образом, квантово-механические расчеты сочетаются с эволюционным алгоритмом в USPEX [1]. Поиск таких структур в системе Cu-Se при различных давлениях от 0 до 100 GPa показал, что при абсолютном нуле и давлении 0.1 GPa стабильными являются составы Cu_6Se_4 и Cu_6Se_6 . Экспериментальная фазовая диаграмма при нормальных условиях содержит фазы таких составов. При низких температурах и высоких давлениях стабильной оказывается фаза состава Cu_6Se_6 . Структуры и па-

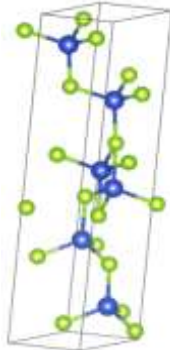
параметры стабильных фаз полученных при расчете представлены в табл.1.

Таблица 1 – Структуры и параметры ячейки при различных давлениях

№	Формула	Давление	Параметры ячейки					
			a, Å	b, Å	c, Å	α , град	β , град	γ , град
1	Cu ₆ Se ₆	0 GPa	3.86306	3.84499	18.97498	90.4460	84.2101	61.7831
2	Cu ₆ Se ₆	0,1 GPa	3.85601	3.87613	18.9626	90.2213	84.2063	61.1486
3	Cu ₆ Se ₆	1 GPa	3.80424	3.85109	18.91275	90.5369	84.3048	61.9967

Полученные результаты можно использовать для моделирования превращений кристаллической структуры.

№	Формула	Давление	Структура
1	Cu ₆ Se ₆	0 GPa	
2	Cu ₆ Se ₆	0,1 GPa	

3	Cu_6Se_6	1 GPa	

Для уточнения стабильности теоретически полученных фаз ведутся расчеты фоновых спектров и будет проведен расчет энтальпии и энтропии.

Работа подготовлена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-32-90216.

Библиографический список

1. USPEX (Universal Structure Predictor: Evolutionary Xtallography) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://uspex-team.org>
2. Брандт Н.Б., Кульбачинский В.А. Квазичастицы в физике конденсированного состояния. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. 632 с.
3. Агемян В.Ф., Серов А.Ю. Спектр экситона в полупроводниковом кристалле. Учебно-методическое пособие // Санкт-Петербургский государственный университет, 2018.
4. Горбачев В.В. Полупроводниковые соединения A2IBIV // М.: Металлургия, 1980. 132 с.
5. Булат Л.П., Иванов А.А., Освенский В.Б., Пшенай-Суверин Д.А., Сорокин А.И. Исследование теплопроводности Cu_2Se с учетом влияния подвижных ионов меди // Физика твердого тела, 2017, том 59, вып. 10, с. 2071–2076.
6. Чопра К., Дас С. Тонкопленочные солнечные элементы: Пер. с англ. с сокращениями. М.: Мир, 1986. 435 с.
7. Kim H., Ballikaya S., Chi H., Ahn J.-P., Ahn K., Uher C., Ctirad U., Kaviani M. Ultralow thermal conductivity of b- Cu_2Se by atomic fluidity and structure distortion // Acta Materialia 86 (2015) 247–253.

8. Rafii-Tabar H., Sutton A.P. Long-range Finnis-Sinclair potentials for f.c.c. metallic alloys //Philosophical Magazine Letters, 1991, V.63, №4, pp. 217–224.

Сведения об авторах

Биккулова Нурия Нагимовна, доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой общей и теоретической физики Стерлитамакского филиала БашГУ. E-mail: bickulova@mail.ru.

Якшибаев Роберт Асгатович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры общей физики физико-технического института БашГУ, E-mail: yakshibaev5252@mail.ru.

Акманова Гузель Рифкатовна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей физики физико-технического института БашГУ. E-mail: grakmanova@mail.ru.

Сафаргалиев Данир Ильдарович, аспирант кафедры общей физики физико-технического института БашГУ. E-mail: danirsafargaliev@gmail.com.

УДК 534.143

Валитов Р.Р., Зеленова М.А.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ВОЛН

Дано краткое описание экспериментальной установки по исследованию процесса низкочастотного торможения фильтрационной волны в слоисто-неоднородной проницаемой среде. Описан порядок проведения измерений и представлены результаты эмпирических исследований.

Ключевые слова: фильтрационные волны, анизотропная среда, скорость волны.

Valitov R.R., Zelenova M.A.

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE VELOCITY OF FILTERING WAVES

A brief description of an experimental setup for studying the process of low-frequency braking of a filtration wave in a layered inhomogeneous permeable medium is given. The procedure for carrying out measurements is described and the results of empirical studies are presented.

Key words: filtration waves, anisotropic medium, wave speed.

Задачи о полях давления при фильтрации жидкости в пористой среде имеют большое практическое значение для нефте- и газодобычи, гидрогеологии, экологии и составляют основу теории массопереноса [1 – 2].

В работе [3] построены аналитические частотные зависимости коэффициента поглощения, волнового числа и фазовой скорости для фильтрационно-волновых полей в высокопроницаемом пропластке, ограниченном сверху и снизу пластами, имеющими высокую проницаемость в вертикальном направлении. Показано, что при уменьшении частоты фазовая скорость волны уменьшается до значений, меньших значений этой скорости в пористой среде, и имеет место низкочастотное торможение.

Для исследования процесса низкочастотного торможения фильтрационной волны в слоисто-неоднородных проницаемых пластах в Стерлитамакском филиале Башкирского государственного университета была создана экспериментальная установка, позволяющая измерять частоты исследуемых сигналов, скорость волны в среде, фазовый сдвиг скорости волны, амплитуду волны, а также рассчитать коэффициент затухания.

Экспериментальная установка включает в себя следующие элементы: ложе для трубы, состоящее из деревянных брусьев; трубы из материала с низкой акустической проводимостью; излучателя акустических колебаний; пяти акустических датчиков давления. Исследуемая среда представляет собой смесь мелкозернистого песка (порядка 50%), гравия (частицы диаметром более 4 мм, порядка 40%) и глины (порядка 10%). Песчано-гравийная смесь заполняется водой в объеме 80 – 100 литров с добавлением пищевой соды и калия перманганата.

Порядок проведения измерений

1. Снять показания термометра и барометра находящихся в помещении.
2. Запустить программу Soundcard Oszilloscope.
3. Установить переключатель датчиков на исследуемый датчик N.
4. Включить излучатель.

5. Отрегулировать настройки программы Soundcard Oscilloscope:
- нажатием на кнопку Sync активизируем показания с выбранного датчика N;
 - установить амплитуды колебаний от первого датчика с помощью кнопок Amplitude CH1;
 - установить такую же амплитуду для выбранного датчика N с помощью кнопок Amplitude CH2;
 - с помощью настроек Offset совместить оси первого и второго графиков по горизонтали;
 - установить частоту развертки ориентируясь на справочники (ожидаемая скорость в пределах 1500 м/с, поэтому достаточно интервала времени 10 мс);
 - выставить желаемую частоту излучателя (например, 12 Гц);
 - вывести, для удобства снятия измерений, временные вертикальные маркеры через кнопку Measure → cursors → Time. Эти маркеры можно перемещать при помощи курсора;
 - в произвольный момент времени остановить картинку кнопкой Run/Stop (эта же кнопка возобновляет динамику измерений);
 - выбрать на кривых колебаний от первого и N-го датчиков однофазные составляющие в пределах одного периода, установить маркеры на соответствующие однофазные точки и измерить временной интервал прохождения одного периода исследуемого сигнала;
 - записать величину временного смещения, которая отображается в нижней части экрана осциллографа;
 - повторить измерения для каждого датчика при одной и той же частоте излучателя для получения статистики (не менее 200 измерений);
 - изменяя частоту колебаний излучателя, произвести измерения временных интервалов прохождения одного периода при других частотах.

Рассчитать скорость фильтрационной волны можно также другим способом. Определив разность хода по времени между исходным сигналом и сигналом на соответствующем датчике. Этот способ измерения временных интервалов позволяет получить наглядную картину прохождения сигналов между первым и выбранным датчиками и определить временные интервалы запаздывания прохождения соответствующих сигналов. Для этого следует уменьшить временную шкалу, для увеличения точности измерения. Так как разность хода между сигналами составляет несколько десятков микросекунд, как

видно из графиков, временной интервал для развертки выбираем от 2 до 4 мс. Приходится довольствоваться этим интервалом времени из-за низкой разрешающей способности программы Soundcard Oscilloscope. Это означает, что при малых временных интервалах, дискрета измерения довольно большая.

Данные, полученные с помощью предшествующих измерений при частоте 500 Гц (при таких частотах фильтрационные эффекты отсутствуют) дают нам значения скорости прохождения сигнала 1462,5 м/с (эта скорость не изменяется с расстоянием), поэтому разность временного интервала прохождения сигнала позволяет оценить изменения фазовой скорости, т.е. замедление скорости сигнала, что и означает наличие фильтрационных волн. С увеличением расстояния от первого до выбранного датчика происходит увеличение временного интервала, что свидетельствует о наличии фильтрационных волн в среде при низких частотах сигнала.

Во время всего эксперимента следует фиксировать температуру и атмосферное давление в лаборатории, в случае резких изменениях показателей следует прекратить эксперимент во избежание нарушения чистоты эксперимента и угрозы повреждения установки.

Порядок и методика обработки результатов измерений

1. Полученные данные необходимо экспортировать в Excel, записать температуру и давление в лаборатории, частоту излучателя и номер выбранного датчика.

2. Рассчитать среднее время прохождения колебаний от первого датчика до исследуемого $\bar{t} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i$.

3. Рассчитать среднюю скорость распространения колебаний от первого датчика до исследуемого $\bar{v}_{li} = \frac{L_{li}}{\bar{t}}$, где L_{li} – расстояние от первого датчика до исследуемого (i – номер датчика).

4. Сравнить скорости $\bar{v}_{13}$, $\bar{v}_{14}$, $\bar{v}_{15}$, $\bar{v}_{16}$ при одинаковых частотах ν .

5. Сравнить каждую скорость $\bar{v}_{li}$ при разных частотах ν ($\bar{v}_{li}|_{\nu_1}$ и $\bar{v}_{li}|_{\nu_2}$).

6. Сделать выводы.

В ходе проведения эксперимента установлено, что при больших частотах излучаемой волны скорость фильтрационной волны совпадает со скоростью акустических волн.

Статья посвящена памяти Р.Р. Валитова, разработчику установки и методики измерения. С глубоким уважением и памятью.

Библиографический список

1. Чекалюк Э. Б. Основы пьезометрии залежей нефти и газа. Киев: ГИТЛ УССР, 1965. 286 с.: ил.
2. Филиппов А.И., Ахметова О.В., Ковальский А.А., Повленкович Р.Ф. Фильтрационные волны в анизотропной среде // Естественные и математические науки в современном мире. 2014. № 14. С. 57-63.
3. Филиппов А.И., Ахметова О.В., Ковальский А.А. Низкочастотное торможение фильтрационной волны в слоисто-неоднородных проницаемых пластах // Прикладная механика и техническая физика. 2018. Т. 59. № 3 (349). С. 103-110.

Сведения об авторах

Валитов Руслан Равильевич, инженер кафедры общей и теоретической физики СФ БашГУ.

Зеленова Марина Анатольевна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей и теоретической физики СФ БашГУ. E-mail: marina_ag@inbox.ru.

УДК 530.145

Давыдов А.П., Злыднева Т.П.

ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ ДВУХ ОДИНОЧНЫХ ФОТОНОВ В СХЕМЕ ОПЫТА ЮНГА В РАМКАХ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВОЛНОВОЙ ФУНКЦИИ ФОТОНА В КООРДИНАТНОМ ПРЕДСТАВЛЕНИИ

С помощью моделирования волновой функции фотона в координатном представлении демонстрируется возникновение отчетливой интерференции в вероятности попадания двух одиночных фотонов в разные точки второго экрана в схеме опыта Юнга, если эти фотоны одновременно испускаются независимыми источниками.

Ключевые слова: двухфотонная интерференция, волновая функция, плотность вероятности, волновой пакет, квантовая механика.

Davydov A.P., Zlydneva T.P.

INTERFERENCE OF TWO SINGLE PHOTONS IN SCHEME OF THE YOUNG'S EXPERIMENT WITHIN THE FRAMEWORK OF MODELING THE PHOTON WAVE FUNCTION IN THE COORDINATE REPRESENTATION

By modeling the photon wave function in the coordinate representation, the emergence of distinct interference in the probability density of hitting of the two single photons into different points of the second screen in scheme of Young's experiment is demonstrated, if these photons were simultaneously emitted by independent sources.

Keywords: two-photon interference, wave function, probability density, wave packet, quantum mechanics.

В классической электродинамике интерференция света объясняется его волновыми свойствами на основе представлений о том, что электромагнитные волны характеризуются напряженностями электрического и магнитного полей. По отношению к отдельному фотону эти понятия перестают иметь непосредственный смысл, так как при испускании отдельного фотона определенным атомом никакого распределения энергии электромагнитного поля в пространстве (и во времени) в принципе не возникает. Энергия фотона всегда *сразу вся* фиксируется в определенной точке в определенном количестве, условно принимаемом в виде $E_{ph} = h\nu$, где ν – некая средняя частота соответствующей электромагнитной волны, возникающей в рамках классической электродинамики в результате «непрерывного» излучения огромного числа атомов. В связи с отсутствием реальной электромагнитной волны как таковой, которая бы адекватно характеризовала отдельный фотон, очевидно, отдельному фотону нельзя приписывать и некоторую среднюю частоту. Тем не менее, в квантовой электродинамике для объяснения результатов интерференции отдельных фотонов принято использовать амплитуды вероятностей, которые содержат такие понятия как напряженность поля и его частота. Эти понятия являются атрибутами «вторичного» квантования электромагнитного поля, хотя для него общепринятого «первичного» квантования до сих пор не построено. Кратко говоря, для фотона не

существует общепринятой волновой функции в координатном представлении, хотя в литературе присутствует довольно много попыток ее ввести и обосновать, как, впрочем, и отказать в ее возможности.

Актуальность однофотонной волновой функции вновь стала возникать в конце прошлого столетия в связи с появлением источников и детекторов отдельных фотонов, а также, еще явственнее, – в связи с появлением новых экспериментов с одиночными и запутанными фотонами – при проверке неравенств Белла (и подобных ему), осуществлении, в последнее время, квантовых телепортации, вычислений и криптографии. В связи с этим появляется интерес объяснить интерференционные явления с одиночными фотонами, в том числе и с запутанными, в рамках «первичного» квантования электромагнитного поля, то есть с применением волновой функции фотона или системы фотонов в координатном представлении. Не останавливаясь на обзоре литературы по данной теме, мы ниже будем опираться на результаты своих построений при развитии квантовой механики фотона.

Перечислим отдельные положения этой теории. Волновая функция фотона в координатном представлении в целом построена и изложена в [1-7]. В частности, в [1, 3, 7] за исходные были взяты уравнения Максвелла в форме Майорана и получено квантовомеханическое уравнение вида Шредингера для шестикомпонентной волновой функции фотона в координатном и импульсном представлениях, связанных между собой (обычным для квантовой механики) Фурье-преобразованием. В [4] проведено «извлечение квадратного корня» из уравнения Даламбера для 4-вектора комплексного потенциала $\Psi^\mu(\mathbf{r}, t)$ в калибровке Лоренца, похожее на вывод уравнения Дирака из уравнения Клейна-Гордона-Фока; установлено уравнение для $\Psi^\mu(\mathbf{r}, t)$, также «вида» уравнения Шредингера. В [2, 6] в кулоновской калибровке для потенциалов поля найдены решения в виде циркулярно-поляризованных плоских волн (собственных функций операторов импульса, энергии и спиральности). Их можно применить для отыскания введенных в [1, 5, 7] функций

$$\varepsilon_{\mathbf{k}, \pm 1}^{(\pm)}(\mathbf{r}, t) = \frac{(Oe)e_{\pm 1}(\mathbf{k})e^{i(\mathbf{k}\mathbf{r} \mp k ct)}}{(2\pi)^{3/2}}; \quad \eta_{\mathbf{k}, \mp 1}^{(\pm)}(\mathbf{r}, t) = \frac{(Oe)e_{\mp 1}(\mathbf{k})e^{i(\mathbf{k}\mathbf{r} \mp k ct)}}{(2\pi)^{3/2}}. \quad (1)$$

Они, в свою очередь, используются [1, 3, 7] для построения волновой функции свободного фотона в координатном представлении – волнового пакета с произвольно задаваемыми коэффициентами $b(\mathbf{k}, \pm 1)$:

$$\Psi^{(\pm)}(\mathbf{r}, t) = \int \frac{b(\mathbf{k}, \pm 1)}{(\text{Oe})} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \xi_{\mathbf{k}, \pm 1}^{(\pm)}(\mathbf{r}, t) d^3\mathbf{k} + \int \frac{b^*(-\mathbf{k}, \mp 1)}{(\text{Oe})} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \eta_{\mathbf{k}, \pm 1}^{(\pm)}(\mathbf{r}, t) d^3\mathbf{k}, \quad (2)$$

где (Oe) – единица измерения («эрстед») величин ξ , η ; знаки « $\pm$ » в верхних индексах отвечают состояниям фотона с положительной и гипотетической отрицательной энергией; в нижних индексах и коэффициентах $b(\mathbf{k}, \pm 1)$ знаки « $\pm$ » соответствуют спиральности λ фотона, согласно верхним знакам. Векторы поляризации удовлетворяют определению $\mathbf{e}_\lambda(\mathbf{k}) = [\mathbf{e}_I(\mathbf{k}) + i\lambda \mathbf{e}_{II}(\mathbf{k})] / \sqrt{2}$, где $\mathbf{e}_I$, $\mathbf{e}_{II}$ – вещественные единичные взаимно ортогональные векторы, образующие правую тройку с вектором $\mathbf{n} = \mathbf{k}/k$ при заданном волновом векторе $\mathbf{k}$.

Функция (2) удовлетворяет уравнению вида Шредингера, полученному, как сказано выше, в [1, 3, 7], она нормирована на единичную вероятность, и из нее можно построить плотность вероятности $\rho_p^{(\pm)}(\mathbf{r}, t)$ обнаружения фотона в окрестности точки $\mathbf{r}$ в любой момент t , которая подчиняется уравнению непрерывности.

Формулу (2), с учетом (1), можно компактно записать в виде

$$\Psi^{(\pm)}(\mathbf{r}, t) = \int b(\mathbf{k}, \pm 1) \Psi_{\mathbf{k}, \pm 1}^{(\pm)}(\mathbf{r}, t) d^3\mathbf{k} + \int b^*(-\mathbf{k}, \mp 1) \Psi_{\mathbf{k}, \mp 1}^{(\pm)}(\mathbf{r}, t) d^3\mathbf{k}, \quad (3)$$

где плоские монохроматические циркулярно поляризованные волны

$$\Psi_{\mathbf{k}, \pm 1}^{(\pm)}(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{(\text{Oe})} \begin{pmatrix} \xi_{\mathbf{k}, \pm 1}^{(\pm)}(\mathbf{r}, t) \\ 0 \end{pmatrix} = \frac{\mathbf{e}_{\pm 1}(\mathbf{k})}{(2\pi)^{3/2}} e^{i(\mathbf{k}\mathbf{r} \mp kct)} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

$$\Psi_{\mathbf{k}, \mp 1}^{(\pm)}(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{(\text{Oe})} \begin{pmatrix} 0 \\ \eta_{\mathbf{k}, \mp 1}^{(\pm)}(\mathbf{r}, t) \end{pmatrix} = \frac{\mathbf{e}_{\mp 1}(\mathbf{k})}{(2\pi)^{3/2}} e^{i(\mathbf{k}\mathbf{r} \mp kct)} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

– безразмерны и удовлетворяют условию ортонормированности

$$\int d^3\mathbf{r} [\Psi_{\mathbf{k}', \lambda}^{(\pm)}(\mathbf{r}, t)]^+ \Psi_{\mathbf{k}, \lambda}^{(\pm)}(\mathbf{r}, t) = \delta_{\lambda' \lambda} \delta(\mathbf{k}' - \mathbf{k}). \quad (6)$$

В [3, 5, 7–9] изучалась эволюция в пространстве и во времени волнового пакета свободного фотона с гауссовским распределением по его импульсам, задаваемым коэффициентами

$$b(\mathbf{k}, \pm 1) = [b(-\mathbf{k}, \mp 1)]^* = \sqrt{\frac{\alpha^3}{2\pi\sqrt{\pi}}} \exp \left[-\frac{\alpha^2}{2} (k_x^2 + k_y^2 + (k_z \mp k_0)^2) - i\mathbf{k}\mathbf{r}_0 \right], \quad (7)$$

где α – коэффициент, определяемый численным решением уравнения, выражающего равенство теоретической формулы для неопределенности энергии фотона в состоянии (3), выведенной в рамках построенной квантовой механики фотона, и значения ΔE из соотношения неопределенности для энергии и времени, в котором задается длительность импульса лазерного излучения. В состоянии (3), (7) фотон имеет среднее значение импульса $\overline{\mathbf{p}}^{(\pm)} = \pm \hbar \mathbf{k}_0 \equiv \pm \hbar k_0 \mathbf{e}_z$, направленное вдоль оси z для реального фотона (с положительной энергией), среднее значение $\mathbf{r}_0 = (x_0, y_0, z_0)$ радиуса-вектора точки его обнаружения в момент $t=0$ и среднее значение $\lambda=0$. При этом векторы поляризации моделировались в виде:

1) при $0 \leq \theta \leq \pi/2$:

$$e_I(\mathbf{k}) = \begin{pmatrix} 1 - (1 - \cos \theta) \cos^2 \varphi \\ -(1 - \cos \theta) \sin \varphi \cos \varphi \\ -\sin \theta \cos \varphi \end{pmatrix}, \quad e_{II}(\mathbf{k}) = \begin{pmatrix} -(1 - \cos \theta) \sin \varphi \cos \varphi \\ \cos \theta + (1 - \cos \theta) \cos^2 \varphi \\ -\sin \theta \sin \varphi \end{pmatrix}; \quad (8)$$

2) при $\pi/2 < \theta \leq \pi$:

$$e_I(\mathbf{k}) = \begin{pmatrix} 1 - (1 + \cos \theta) \cos^2 \varphi \\ -(1 + \cos \theta) \sin \varphi \cos \varphi \\ \sin \theta \cos \varphi \end{pmatrix}, \quad e_{II}(\mathbf{k}) = \begin{pmatrix} (1 + \cos \theta) \sin \varphi \cos \varphi \\ \cos \theta - (1 + \cos \theta) \cos^2 \varphi \\ -\sin \theta \sin \varphi \end{pmatrix}, \quad (9)$$

где по вертикали указаны декартовы проекции соответствующих векторов в конфигурационном пространстве, записанные через сферические координаты вектора $\mathbf{k}$ в импульсном пространстве.

В [3, 5, 7–9] установлено, что пространственная «сферическая» начальная форма волнового пакета со временем трансформируется в «конусообразную», причем на оси z симметрии пакета плотность вероятности обнаружения фотона в окрестности его центра движется почти со скоростью света в вакууме, а чем дальше от оси z , тем ниже скорость в направлении средней скорости пакета. Скорость трансформации волнового пакета (3) тем больше, чем сильнее он локализован вначале, согласно общим представлениям квантовой механики.

В данной статье излагаются результаты моделирования двухфотонной интерференции, с учетом, что волновая функция системы фотонов равна сумме волновых функций вида (3) каждого фотона:

$$\Psi^{(\pm)}(\mathbf{r}, t) = \Psi_1^{(\pm)}(\mathbf{r}, t) + \Psi_2^{(\pm)}(\mathbf{r}, t). \quad (10)$$

Будем считать, что фотоны одновременно в момент $t=0$ излучаются независимыми источниками S_1 и S_2 в плоскости xOz и попадают (см. рис. 1) в заданную точку $P(x, 0, z)$. Тогда плотность вероятности обнаружения любого какого-нибудь из этих двух фотонов будет определяться [1, 3, 5, 7, 9–12] формулой

$$\rho_P^{(\pm)}(\mathbf{r}, t) = [\Psi^{(\pm)}(\mathbf{r}, t)]^+ \Psi^{(\pm)}(\mathbf{r}, t), \quad (11)$$

тогда как если бы каждый источник излучал фотон отдельно от другого, то вероятности попадания в ту же самую точку определялись бы для каждого источника одним соответствующим слагаемым в (10):

$$\rho_{P1}^{(\pm)}(\mathbf{r}, t) = [\Psi_1^{(\pm)}(\mathbf{r}, t)]^+ \Psi_1^{(\pm)}(\mathbf{r}, t), \quad \rho_{P2}^{(\pm)}(\mathbf{r}, t) = [\Psi_2^{(\pm)}(\mathbf{r}, t)]^+ \Psi_2^{(\pm)}(\mathbf{r}, t). \quad (12)$$

Поскольку источники направляют свой фотон в точку P под углами α_1 и, соответственно, α_2 , то распределение (7) по импульсам следует видоизменить, с учетом, что средний импульс в этих пакетах должен задаваться векторами $\mathbf{k}_{01}$ и $\mathbf{k}_{02}$, определяемыми геометрией.

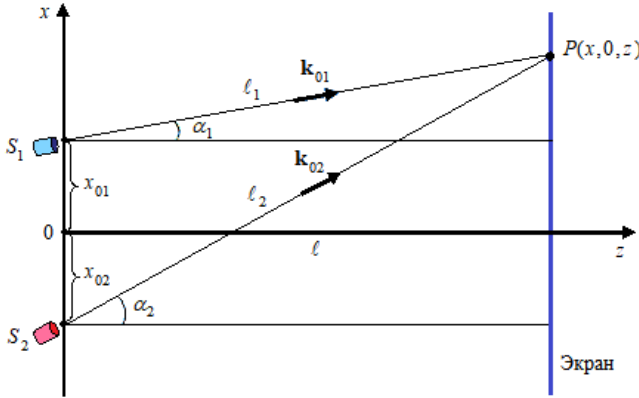


Рис. 1. Геометрия схемы мысленного эксперимента двухфотонной интерференции от двух независимых источников фотонов S_1 и S_2

Опуская дополнительные индексы 1 и 2 для каждого соответствующего фотона, такое изменение можно отразить формулой

$$b(\mathbf{k}, \pm 1) = [b(-\mathbf{k}, \mp 1)]^* = \sqrt{\frac{\alpha^3}{2\pi\sqrt{\pi}}} \exp \left[-\frac{\alpha^2}{2} \left((k_x \mp k_{0x})^2 + k_y^2 + (k_z \mp k_{0z})^2 \right) - i\mathbf{k}\mathbf{r}_0 \right], \quad (13)$$

где вместо k_{0x} и k_{0z} подразумеваются, соответственно, величины

$$k_{0x1} = k_0 \frac{x - x_{01}}{\sqrt{\ell^2 + (x - x_{01})^2}}, \quad k_{0x2} = k_0 \frac{x - x_{02}}{\sqrt{\ell^2 + (x - x_{02})^2}}, \quad (14)$$

$$k_{0z1} = k_0 \frac{\ell}{\sqrt{\ell^2 + (x - x_{01})^2}}, \quad k_{0z2} = k_0 \frac{\ell}{\sqrt{\ell^2 + (x - x_{02})^2}}. \quad (15)$$

Получение аналитических выражений для плотностей вероятностей (11) и (12) с учетом (даже наиболее простой) формулы (13), а также (8) и (9), не представляется возможным. Численное вычисление также сталкивается с определенными трудностями, так как приходится вычислять несколько видов двукратных интегралов, которые по переменной k являются несобственными (см. ниже формулу (18)), а подынтегральные выражения представляют собой при значениях α , имеющих практический интерес с точки зрения реального излучения (с заданными длиной волны $\lambda_0 = 2\pi/k_0$ и длительностью импульса τ), произведения очень малых функций (в области интегрирования), часто приводящих к машинному нулю, на очень большие. Поэтому ниже будут приведены результаты для некоторых доступных для вычисления параметров излучения, полученные на обычном домашнем компьютере с использованием программного пакета Maple.

В результате интегрирования по азимутальному углу φ вектора $\mathbf{k}$, каждое слагаемое $\Psi_i^{(\pm)}(\mathbf{r}, t)$ в (10), где $i = 1, 2$, можно записать как

$$\Psi_i^{(\pm)}(\mathbf{r}, t) = \begin{pmatrix} u_i^{(\pm)}(\mathbf{r}, t) \\ v_i^{(\pm)}(\mathbf{r}, t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} u_i^{(\pm)}(\mathbf{r}, t) + \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} v_i^{(\pm)}(\mathbf{r}, t), \quad (16)$$

где

$$u_i^{(\pm)}(\mathbf{r}, t) \equiv \begin{pmatrix} u_{ix}^{(\pm)}(\mathbf{r}, t) \\ u_{iy}^{(\pm)}(\mathbf{r}, t) \\ u_{iz}^{(\pm)}(\mathbf{r}, t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_{ix}^{(\pm)}(\mathbf{r}, t) \\ -v_{iy}^{(\pm)}(\mathbf{r}, t) \\ v_{iz}^{(\pm)}(\mathbf{r}, t) \end{pmatrix}; \quad v_i^{(\pm)}(\mathbf{r}, t) \equiv \begin{pmatrix} v_{ix}^{(\pm)}(\mathbf{r}, t) \\ v_{iy}^{(\pm)}(\mathbf{r}, t) \\ v_{iz}^{(\pm)}(\mathbf{r}, t) \end{pmatrix}; \quad (17)$$

$$u_i^{(\pm)}(\mathbf{r}, t) = \frac{\alpha}{2\pi} \sqrt{\frac{\alpha}{2\sqrt{\pi}}} e^{-\alpha^2 k_0^2 / 2} \int_0^\infty dk k^2 e^{-\alpha^2 k_0^2 / 2 \mp i k c t} F_i^{(\pm)}(k), \quad (18)$$

$$F_i^{(\pm)}(k) \equiv \int_0^1 d\xi \begin{pmatrix} [J_0(\kappa_i)(1+\xi) + J_2(\kappa_i)(1-\xi)] \cosh(k \varsigma_i \xi) \\ \pm i [J_0(\kappa_i)(1+\xi) - J_2(\kappa_i)(1-\xi)] \sinh(k \varsigma_i \xi) \\ -2i J_1(\kappa_i) \sqrt{1-\xi^2} \sinh(k \varsigma_i \xi) \end{pmatrix}, \quad (19)$$

где J_0, J_1, J_2 – функции Бесселя от аргумента $\kappa_i = k \gamma_i \sqrt{1-\xi^2}$ и введены обозначения: $\gamma_i = x - x_{0i} \mp i \alpha^2 k_{0xi}$; $\varsigma_i = iz \pm \alpha^2 k_{0zi}$.

На рис. 2 приведен график плотности вероятности обнаружения фотона (любого из двух) при одновременном излучении обоих источников – в виде кривой $\rho_P^{(+)}$ как функции координаты x точки наблюдения P на экране (см. рис. 1) для излучения с длиной волны $\lambda_0 = 1.5$ см и длительностью $\tau = 100$ пс, при $x_{01} = -x_{02} = 1.5$ см, $\ell = 2c\tau = 6.00$ см в момент времени $t = 2\tau = 200$ пс. Параметры такого излучения соответствуют значению (в (13)) $\alpha = 4.236338$ см².

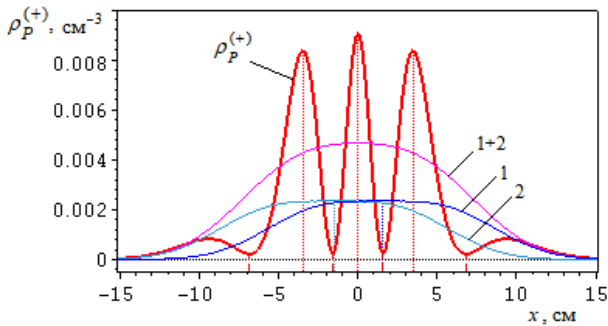


Рис. 2. Проявление двухфотонной интерференции от двух независимых источников фотонов S_1 и S_2 при $\lambda_0 = 1.5$ см, $\tau = 100$ пс, $x_{01} = -x_{02} = 1.5$ см, $\ell = 2c\tau = 6.00$ см в момент $t = 2\tau = 200$ пс

Как видно из рис. 2, кривая $\rho_P^{(+)}$ демонстрирует явно выраженную интерференцию с тремя острыми пиками и двумя сглаженными

менее интенсивными крайними пиками. В центре – ожидаемый наибольший интерференционный пик. Также приведены кривые 1 и 2 соответственно для плотностей вероятности (12) обнаружения фотона, излучаемого только либо первым источником, либо вторым, а также – их «арифметической» суммы (кривая «1+2»).

На рис. 3 приведены аналогичные графики, что и на рис. 2, для излучения с длиной волны $\lambda_0 = 0.05$ см и длительностью $\tau = 5$ пс, при $x_{01} = -x_{02} = 0.035$ см, $\ell = 5c\tau = 0.7495$ см в момент времени $t = 5.4\tau = 27$ пс. Эти параметры излучения соответствуют значению (в (13)) $\alpha = 0.211911$ см².

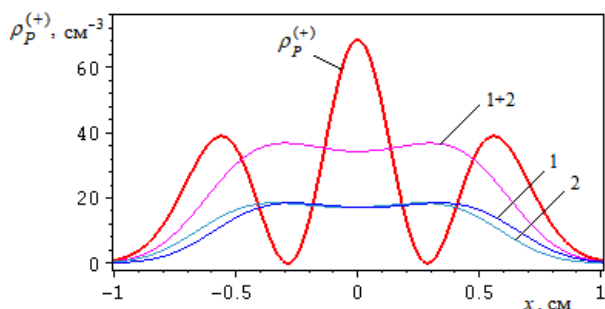


Рис. 3. Проявление двухфотонной интерференции от двух независимых источников фотонов S_1 и S_2 при $\lambda_0 = 0.05$ см, $\tau = 5$ пс, $x_{01} = -x_{02} = 0.035$ см, $\ell = 5c\tau = 0.7495$ см в момент $t = 5.4\tau = 27$ пс

Изложенные результаты находятся в полном согласии с опубликованными ранее [9–12] обоснованиями возможности объяснения интерференции электромагнитных волн с помощью волновой функции фотона в координатном представлении.

Библиографический список

1. Давыдов А.П. Волновая функция фотона в координатном представлении // Вестник МаГУ. Вып. 5. Естественные науки. Магнитогорск: МаГУ, 2004. С. 235-243.
2. Давыдов А. П. Выбор комплексных потенциалов электромагнитного поля при моделировании эволюции однофотонного волнового пакета // Информационные технологии в науке, управлении, соци-

альной сфере и медицине: сб. науч. трудов III Межд. конф. Ч. I. – Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2016. С. 25-27.

3. Давыдов А.П., Злыднева Т.П. Однофотонный подход к моделированию короткоимпульсного лазерного излучения // Вестник науки и образования Севера-Запада России: электронный журнал. 2015. Т. 1. № 4. URL: <http://vestnik-nauki.ru/wp-content/uploads/2015/11/2015-№4-Давыдова.pdf>.

4. Давыдов А.П. Линеаризация волновых уравнений для потенциалов свободного электромагнитного поля с целью его квантовомеханического описания // Проблемы физ.-мат. образования в педагогич. вузах России на соврем. этапе: тез. науч.-практ. конф. Магнитогорск: Изд-во МГПИ, 1996. С. 116-120.

5. Давыдов А.П. Моделирование распространения в трехмерном пространстве волнового пакета фотона // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: матер. 73-й межд. науч.-тех. конф. Магнитогорск: МГТУ, 2015. Т.3. С. 133-137.

6. Давыдов, А.П. О волновой функции фотона в координатном представлении в терминах электромагнитных потенциалов // Современные проблемы науки и образования: матер. L внутривуз. науч. конф. МаГУ. Магнитогорск: МаГУ, 2012. С. 228-229.

7. Davydov A., Zlydneva T. Modeling of short-pulse laser radiation in terms of photon wave function in coordinate representation // Paper book of the International Forum IEET-2015, Izhevsk: Publish House of Kalashnikov ISTU. 2016. P. 51-63.

8. Davydov A.P., Zlydneva T.P. On the reduction of free photons speed in modeling of their propagation in space by the wave function in coordinate representation // 13th International scientific-technical conf. APEIE – 39281 proceedings. Novosibirsk. 2016. Vol. 1. P. 233-240.

9. Davydov A.P., Zlydneva T.P. The Young's interference experiment in the light of the single-photon modeling of the laser radiation // ITSMSM-2016. P. 208-215. doi: 10.2991/itsmssm-16.2016.100.

10. Давыдов, А.П. Злыднева Т.П. Интерференция электромагнитных волн с точки зрения волновой функции фотона в координатном представлении // Электромагнитные волны и электронные системы. 2018. Т. 23. № 8. С. 27-40.

11. Davydov A.P., Zlydneva T.P. The Modeling of the Young's interference experiment in terms of single-photon wave function in the coordinate representation // Proc. IV ITSMSM-2017. 2017. P. 257-265. doi: 10.2991/itsmssm-17.2017.54.

12. Davydov A.P., Zlydneva T.P. On the wave-particle duality within the framework of modeling single-photon interference // J. Phys.: Conf. Ser. 2019. Vol. 1399. Pap. 02219.

Сведения об авторах

Давыдов Александр Петрович, канд. физ.-мат. наук, доцент МГТУ им. Г.И. Носова (Магнитогорск). Email: ap-dav@yandex.ru.

Злыднева Татьяна Павловна, кандидат педагогических наук, доцент МГТУ им. Г.И. Носова (Магнитогорск). E-mail: tapazl@yandex.ru.

УДК 530.145

Давыдов А.П., Злыднева Т.П.

О КООРДИНАТНОЙ ВОЛНОВОЙ ФУНКЦИИ ДВУХ ФОТОНОВ В ЗАПУТАННОМ СОСТОЯНИИ НА ВЫХОДЕ ИЗ НЕЛИНЕЙНОГО КРИСТАЛЛА

Конструируется волновая функция в координатном представлении двух запутанных фотонов в состоянии на выходе из нелинейного кристалла путем моделирования векторов поляризации и применения гауссовского импульсного распределения для каждого из фотонов.

Ключевые слова: поляризация фотона, волновая функция, плотность вероятности, волновой пакет, квантовая механика.

Davydov A.P. Zlydneva T.P.

ON THE COORDINATE WAVE FUNCTION OF TWO PHOTONS IN ENTANGLED STATE AT THE OUTPUT OF NONLINEAR CRYSTAL

The wave function is constructed in the coordinate representation of two entangled photons in a state at the exit from a nonlinear crystal by modeling the polarization vectors and applying a Gaussian momentum distribution for each of the photons.

Keywords: photon polarization, wave function, probability density, wave packet, quantum mechanics.

В течение примерно последних полтора десятка лет интенсивно развиваются новые направления в квантовой физике, такие как квантовые компьютеры, квантовые криптография и телепортация, форму-

лировка и проверка классического и квантового «реализмов» и нелокальности взаимодействий и т.д. Обсуждение этих направлений приводит к новым идеям, выходящим за рамки ортодоксальной квантовой механики. Часто в основе новых идей прослеживается реализация и использование однофотонных и «запутанных» двух- и многофотонных состояний. В частности, не ослабевает интерес к метафизическому пониманию «однофотонной» интерференции в схемах, эквивалентных опыту Юнга с двумя щелями, например, в интерферометре Маха-Цендера, в котором фотон «интерферируют сам с собой».

В экспериментах с отдельными фотонами их уже нельзя рассматривать в качестве классической электромагнитной волны, пусть даже в виде неких ограниченных в пространстве и во времени «цугов» электромагнитных волн, так как каждый фотон всегда регистрируется целиком, без разделения на части по его энергии и/или импульсу. При этом результаты экспериментов с фотонами трактуются с помощью амплитуд квантовых переходов в рамках вторичного квантования электромагнитного поля. Вместе с этим, в физике без колебаний констатируется корпускулярно-волновой дуализм как фотонов, так и частиц, обладающих массой, причем, по сути, на равных правах. Однако если для частиц с массой с этим «дуализмом» еще можно как-то согласиться, с позиции копенгагенской интерпретации квантовой механики, то с представлением о фотоне как о корпускуле – довольно трудно, ввиду невозможной локализации фотонов в пространстве. С другой стороны, язык квантовых амплитуд напрямую эксплуатирует «идеи», что фотоны будто бы проявляют себя как корпускулы в некоторых состояниях в экспериментах с одиночными фотонами, таких, например в интерферометре Маха-Цендера.

На наш взгляд, противоречивость друг другу таких представлений о фотонах можно устранить и, в частности, существенным образом сгладить дилемму «волна-частица», если для описания соответствующих явлений с «отдельными» фотонами использовать волновую функцию в координатном представлении. В ряде работ [1–10] это было сделано для описания однофотонной интерференции. *Цель настоящей статьи – продемонстрировать возможность описания с помощью координатной волновой функции запутанного состояния двух фотонов, образованного при их вылете из нелинейного кристалла в начальный момент времени.*

В [11–13] на основе решений уравнений Максвелла, представленных Майорана в квантово-механической форме, построена волно-

вая функция фотона в координатном представлении – волновой пакет с некоторыми произвольными коэффициентами $b(\mathbf{k}, \pm 1)$:

$$\begin{aligned} \Psi^{(\pm)}(\mathbf{r}, t) = & \int \frac{b(\mathbf{k}, \pm 1)}{(2\pi)^{3/2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} e_{\pm 1}(\mathbf{k}) e^{i(\mathbf{k}\mathbf{r} \mp k ct)} d^3\mathbf{k} + \\ & + \int \frac{[b(-\mathbf{k}, \mp 1)]^*}{(2\pi)^{3/2}} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} e_{\mp 1}(\mathbf{k}) e^{i(\mathbf{k}\mathbf{r} \mp k ct)} d^3\mathbf{k}, \end{aligned} \quad (1)$$

где знаки “ $\pm$ ” в верхних индексах соответствуют фотону с положительной и гипотетической отрицательной энергией, и “ $\pm$ ” или “ $\mp$ ” в нижних индексах и коэффициентах $b(\mathbf{k}, \pm 1)$ – отвечают фотону со спиральностью λ , в соответствии с верхними знаками. В (1) $\mathbf{e}_\lambda(\mathbf{k}) = [\mathbf{e}_I(\mathbf{k}) + i\lambda \mathbf{e}_{II}(\mathbf{k})]/\sqrt{2}$ – комплексные векторы поляризации; $\mathbf{e}_I$, $\mathbf{e}_{II}$ – вещественные взаимно ортогональные единичные векторы, образующие правую тройку с единичным вектором $\mathbf{n} = \mathbf{k}/k$:

$$|\mathbf{e}_I| = |\mathbf{e}_{II}| = 1; \quad (\mathbf{e}_I, \mathbf{n}) = (\mathbf{e}_{II}, \mathbf{n}) = (\mathbf{e}_I, \mathbf{e}_{II}) = 0; \quad \mathbf{e}_{II} = [\mathbf{n} \times \mathbf{e}_I]. \quad (2)$$

причем $\mathbf{e}_I$ не меняется, если $\mathbf{n}$ изменяется на $-\mathbf{n}$: $\mathbf{e}_I(\mathbf{n}) = \mathbf{e}_I(-\mathbf{n})$.

Из (2) следует, что $\mathbf{n} = i\lambda [\mathbf{e}_\lambda \times \mathbf{e}_\lambda^*]$; $[\mathbf{e}_\lambda(\mathbf{k})]^* = \mathbf{e}_{-\lambda}(\mathbf{k})$, а также:

$$(\mathbf{e}_{\lambda'}^*, \mathbf{e}_\lambda) = \delta_{\lambda'\lambda}; \quad \mathbf{e}_{\lambda'}^+, \mathbf{e}_\lambda = \delta_{\lambda'\lambda}; \quad \mathbf{e}_\lambda(\mathbf{n}) = \mathbf{e}_{-\lambda}(-\mathbf{n}). \quad (3)$$

Волновая функция (1) удовлетворяет уравнению вида Шредингера, установленного в [11–13], нормировке на единичную вероятность и уравнению непрерывности для плотности вероятности $\rho_P^{(\pm)}(\mathbf{r}, t)$ обнаружения фотона вблизи точки $\mathbf{r}$ в момент t . Для свободного или дифрагирующего фотона коэффициенты $b(\mathbf{k}, \pm 1)$ должны определяться из начальных и граничных условий и, как сказано, удовлетворять условию нормировки на единичную вероятность:

$$\begin{aligned} \langle \Psi^{(\pm)} | \Psi^{(\pm)} \rangle &= \int \rho_P^{(\pm)}(\mathbf{r}, t) d^3\mathbf{r} = \int d^3\mathbf{k} \rho_P^{(\pm)}(\mathbf{k}) = \\ &= \int d^3\mathbf{k} \{ |b(\mathbf{k}, \pm 1)|^2 + |b(-\mathbf{k}, \mp 1)|^2 \} = 1. \end{aligned} \quad (4)$$

В [1, 13, 14] проведено моделирование волнового пакета с гауссовским распределением по импульсам фотона. Для этого коэффициенты $b(\mathbf{k}, \pm 1)$ были выбраны в виде

$$b(\mathbf{k}, \pm 1) = [b(-\mathbf{k}, \mp 1)]^* =$$

$$= \sqrt{\frac{\alpha^3}{2\pi\sqrt{\pi}}} \exp \left[-\frac{\alpha^2}{2} (k_x^2 + k_y^2 + (k_z \mp k_0)^2) - i\mathbf{k}\mathbf{r}_0 \right], \quad (5)$$

где α – коэффициент, определяемый из численного решения уравнения для неопределенности ΔE энергии фотона в состоянии (1), выведенной теоретически в рамках построенной теории, приравненной к значению ΔE из соотношения неопределенности для энергии и времени, в котором задается длительность излучения фотона.

В [1, 13, 14] векторы поляризации принимались в виде:

1) при $0 \leq \theta \leq \pi/2$:

$$e_I(\mathbf{k}) = \begin{pmatrix} 1 - (1 - \cos \theta) \cos^2 \varphi \\ -(1 - \cos \theta) \sin \varphi \cos \varphi \\ -\sin \theta \cos \varphi \end{pmatrix}, \quad e_{II}(\mathbf{k}) = \begin{pmatrix} -(1 - \cos \theta) \sin \varphi \cos \varphi \\ \cos \theta + (1 - \cos \theta) \cos^2 \varphi \\ -\sin \theta \sin \varphi \end{pmatrix}; \quad (6)$$

2) при $\pi/2 < \theta \leq \pi$:

$$e_I(\mathbf{k}) = \begin{pmatrix} 1 - (1 + \cos \theta) \cos^2 \varphi \\ -(1 + \cos \theta) \sin \varphi \cos \varphi \\ \sin \theta \cos \varphi \end{pmatrix}, \quad e_{II}(\mathbf{k}) = \begin{pmatrix} (1 + \cos \theta) \sin \varphi \cos \varphi \\ \cos \theta - (1 + \cos \theta) \cos^2 \varphi \\ -\sin \theta \sin \varphi \end{pmatrix}, \quad (7)$$

где в столбцах приведены декартовы компоненты векторов в конфигурационном трехмерном пространстве, записанные через сферические координаты волнового вектора $\mathbf{k}$ в импульсном пространстве.

В состоянии (1), (5) фотон имеет средний импульс $\mathbf{p}^{(\pm)} = \pm \hbar \mathbf{k}_0$, направленный вдоль оси z для реального фотона (с положительной энергией), среднее значение $\mathbf{r}_0 = (x_0, y_0, z_0)$ радиуса-вектора точки его обнаружения в момент $t=0$ и среднее значение $\lambda=0$.

Как сказано выше, в экспериментах с одиночными фотонами нельзя для их характеристик использовать понятия напряженностей электрического и магнитного полей. Однако при анализе одно- и двухфотонных явлений, по сути, применяется язык классической электродинамики. Например, при пропускании фотонов через поляризатор добиваются изменения их «поляризации» и вероятности прохождения, на основе закона Малюса. Этот закон строго выводится лишь в классической электродинамике, а в квантовой – *постулируется*. Его, что очень важно, с другой стороны, можно обосновать и в рамках построенной квантовой механики фотона [15] – в рамках первичного квантования поля, что, очевидно, добавляет ей значимости.

Когда говорят о линейной поляризации фотонов, например, горизонтальной или вертикальной, в состоянии их запутанности, то имеют в виду плоскость, в которой «как бы» должен колебаться, будучи рассматриваемым в классической электродинамике, соответствующий вектор напряженности электрического поля. Следовательно, несмотря на неприменимость напряженности поля к отдельному фотону, она используется в некотором «метафизическом» смысле.

Можно ли придать этому понятию некий «более физический смысл»? Ответ, по нашему мнению, – да. В самом деле, в один из полных наборов физических величин, характеризующих состояние свободного фотона, входят его энергия, импульс и спиральность [12, 13]. Состоянию фотона с определенной спиральностью в классической электродинамике соответствует поляризованная по кругу волна. Линейной же поляризации классической волны в квантовой механике не соответствует никакой величины, входящей в полный набор. Тогда возникает вопрос: как, наиболее полно, но кратко, можно охарактеризовать, например, волновой пакет (1) с коэффициентами (5)? Можно, конечно, к его характеристикам добавить, что векторы поляризации выбраны в виде (6), (7). Однако проще сказать, что извлекаемая, определенной процедурой, «напряженность электрического поля» из формул (1), (5), (6), (7) имеет лишь одну ненулевую компоненту – E_x . Она и может служить дополнительной характеристикой состояния фотона, выражающей собой некое свойство «его поляризации», отвечающее линейной поляризации классической волны.

Можно ли построить волновой пакет, в котором по-прежнему было бы среднее значение $\lambda=0$, а волновой пакет ничем не отличался бы от (1), за исключением, что фотон характеризовался бы лишь одной ненулевой компонентой E_y ? Ответ – снова положительный.

Для этого нужно выбрать векторы поляризации в следующем виде:

1) при $0 \leq \theta \leq \pi/2$:

$$\tilde{e}_I(\mathbf{k}) = \begin{pmatrix} -(1-\cos\theta)\sin\varphi\cos\varphi \\ 1-(1-\cos\theta)\sin^2\varphi \\ -\sin\theta\sin\varphi \end{pmatrix}, \quad \tilde{e}_{II}(\mathbf{k}) = \begin{pmatrix} -\cos\theta-(1-\cos\theta)\sin^2\varphi \\ (1-\cos\theta)\sin\varphi\cos\varphi \\ \sin\theta\cos\varphi \end{pmatrix}; \quad (8)$$

2) при $\pi/2 < \theta \leq \pi$:

$$\tilde{e}_I(\mathbf{k}) = \begin{pmatrix} -(1+\cos\theta)\sin\varphi\cos\varphi \\ 1-(1+\cos\theta)\sin^2\varphi \\ \sin\theta\sin\varphi \end{pmatrix}; \quad \tilde{e}_{II}(\mathbf{k}) = \begin{pmatrix} -\cos\theta + (1+\cos\theta)\sin^2\varphi \\ -(1+\cos\theta)\sin\varphi\cos\varphi \\ \sin\theta\cos\varphi \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Можно показать (см. [16]), что, аналогично тому как в случае (6), (7) возникает лишь одна ненулевая компонента E_x , в случае (8), (9) возникает такая же по величине лишь одна ненулевая компонента напряженности электрического поля E_y . Формула для нее такова:

$$E_y = \text{Re} \left\{ \frac{\sqrt{\hbar c} \exp(S)}{4\pi^{3/4} \alpha^{3/2} \zeta^2} \left[-\frac{q\pi \exp(Q)}{(-q^2)^{1/4}} (2\zeta F_1 + qF_2) - \right. \right. \\ \left. \left. -(1-i)\sqrt{p} (2\zeta F_3 - pF_4) \exp(P) + 2(1-i)(ct)^{3/2} F_5 \exp(R) \right] \right\}, \quad (10)$$

где

$$b = \pm \alpha^2 k_0 + iz, \quad \zeta = z - i\alpha^2 k_0, \quad p = ct + \zeta, \quad q = ct - \zeta, \\ P = -\frac{p^2}{4\alpha^2}, \quad Q = -\frac{q^2}{4\alpha^2}, \quad R = -\frac{c^2 t^2}{4\alpha^2}, \quad S = -\frac{\alpha^2 k_0^2}{2}, \\ F_1 = (1+4Q)[I_{-1/4}(Q) + I_{1/4}(Q)] + 4Q[I_{-3/4}(Q) + I_{3/4}(Q)], \\ F_2 = I_{-1/4}(Q) + I_{1/4}(Q) + I_{-3/4}(Q) + I_{3/4}(Q), \\ F_3 = (1+4P)K_{1/4}(P) - 4PK_{3/4}(P), \quad F_4 = K_{3/4}(P) - K_{1/4}(P), \\ F_5 = K_{3/4}(R) - K_{1/4}(R),$$

где I_ν и K_ν – функции Бесселя мнимого аргумента. При $t=0$ формула (10) имеет намного более простой вид, указанный в [17].

Таким образом, будем считать, что формулы (6), (7) задают горизонтальную (H) поляризацию, а (8), (9) – вертикальную (V) поляризацию фотона в его в состоянии (I).

Источником двух запутанных фотонов обычно является нелинейный кристалл, на который падает луч лазера. В результате спонтанного параметрического рассеяния на выходе возникают два конуса поляризации H и V, несущие пары фотонов в запутанном состоянии (бифотоны). В частном случае, состояние, наиболее запутанное по поляризациям фотонов, описывается вектором [16]

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{2} \left(|H\rangle_1 |m\rangle_1 \cdot |H\rangle_2 |n\rangle_2 + |H\rangle_1 |n\rangle_1 \cdot |H\rangle_2 |m\rangle_2 + \right. \\ \left. + |V\rangle_1 |m\rangle_1 \cdot |V\rangle_2 |n\rangle_2 + |V\rangle_1 |n\rangle_1 \cdot |V\rangle_2 |m\rangle_2 \right), \quad (11)$$

где номера 1 и 2 относятся к первому и второму фотону одной пары, $|m\rangle$ и $|n\rangle$ описывают пространственные состояния в первом и втором пучке. Конструируя волновую функцию системы в координатном представлении, каждой из 8 одночастичных мод, входящих в (11), нужно сопоставить волновой пакет (1) с гауссовским, например, распределением (5) по импульсам и соответствующим выбором векторов поляризации, с учетом двух обстоятельств. Во-первых, в (11) одночастичные моды означают состояния фотона с определенными импульсом и поляризацией, а пакет (1) для фотона – суперпозиция «плоских монохроматических волн». Однако состояние (1) можно сколь угодно близко приближать к плоской волне, устремляя $\alpha \rightarrow \infty$. Во-вторых, в (11) состояния $|m\rangle$ и $|n\rangle$ образуют ортонормированный базис для каждого фотона в отдельности. Для осуществления этого свойства при записи одночастичной волновой функции, соответствующей каждой из 8 мод в (11), вида $|H\rangle_1|m\rangle_1$, $|H\rangle_2|n\rangle_2$ и т.д., можно пакет (1) дополнить множителем $\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ – для состояния $|m\rangle$ и

$\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$ – для $|n\rangle$. Так как функция (1) является 6-компонентной, возникающая конструкция с таким множителем будет иметь 12 компонент.

Построим теперь волновую функцию в координатном представлении двух фотонов в запутанном состоянии (11), полагая, что при $t=0$ их средние значения координат (x, y, z) соответственно равны $(0, -y_0, 0)$ и $(0, y_0, 0)$, средние значения проекций импульсов (p_x, p_y, p_z) , равны $(0, -\hbar k_{0y}, \hbar k_{0z})$ и $(0, \hbar k_{0y}, \hbar k_{0z})$ и определяют направления соответствующих осей пучков $|m\rangle$ и $|n\rangle$; ось симметрии всей системы совпадает с осью z . Пусть пучок $|m\rangle$ формирует H -поляризацию, а пучок $|n\rangle$ – V -поляризацию. Тогда для пучка $|m\rangle$ надо использовать формулы (8) и (9), а для пучка $|n\rangle$ – (6) и (7). В результате, для первого и второго множителя в первом слагаемом в (11) тогда, соответственно, получаем:

$$\Psi_{Hm}^{(\pm)}(\mathbf{r}_1, t) = \frac{1}{(2\pi)^2} \sqrt{\frac{\alpha^3}{\sqrt{\pi}}} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \int \exp \left[-\frac{\alpha^2}{2} (k_x^2 + k_y \mp k_{0y})^2 + (k_z \mp k_{0z})^2 \right] +$$

$$\begin{aligned}
& + i(\mathbf{k}\mathbf{r}_1 \mp k c t - k_y y_0) \left] \begin{pmatrix} \tilde{\mathbf{e}}_{\pm 1}(\mathbf{k}) \\ \tilde{\mathbf{e}}_{\mp 1}(\mathbf{k}) \end{pmatrix} d^3 \mathbf{k}, \\
\Psi_{Hn}^{(\pm)}(\mathbf{r}_2, t) = & \frac{1}{(2\pi)^2} \sqrt{\frac{\alpha^3}{\sqrt{\pi}}} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \int \exp \left[-\frac{\alpha^2}{2} (k_x^2 + (k_y \pm k_{0y})^2 + (k_z \mp k_{0z})^2) \right] + \\
& + i(\mathbf{k}\mathbf{r}_2 \mp k c t + k_y y_0) \left] \begin{pmatrix} \tilde{\mathbf{e}}_{\pm 1}(\mathbf{k}) \\ \tilde{\mathbf{e}}_{\mp 1}(\mathbf{k}) \end{pmatrix} d^3 \mathbf{k}.
\end{aligned}$$

Двум множителям второго слагаемого в (11) отвечают функции

$$\begin{aligned}
\Psi_{Hn}^{(\pm)}(\mathbf{r}_1, t) = & \frac{1}{(2\pi)^2} \sqrt{\frac{\alpha^3}{\sqrt{\pi}}} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \int \exp \left[-\frac{\alpha^2}{2} (k_x^2 + (k_y \pm k_{0y})^2 + (k_z \mp k_{0z})^2) \right] + \\
& + i(\mathbf{k}\mathbf{r}_1 \mp k c t + k_y y_0) \left] \begin{pmatrix} \tilde{\mathbf{e}}_{\pm 1}(\mathbf{k}) \\ \tilde{\mathbf{e}}_{\mp 1}(\mathbf{k}) \end{pmatrix} d^3 \mathbf{k}, \\
\Psi_{Hm}^{(\pm)}(\mathbf{r}_2, t) = & \frac{1}{(2\pi)^2} \sqrt{\frac{\alpha^3}{\sqrt{\pi}}} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \int \exp \left[-\frac{\alpha^2}{2} (k_x^2 + (k_y \mp k_{0y})^2 + (k_z \mp k_{0z})^2) \right] + \\
& + i(\mathbf{k}\mathbf{r}_2 \mp k c t - k_y y_0) \left] \begin{pmatrix} \tilde{\mathbf{e}}_{\pm 1}(\mathbf{k}) \\ \tilde{\mathbf{e}}_{\mp 1}(\mathbf{k}) \end{pmatrix} d^3 \mathbf{k}.
\end{aligned}$$

Последующие четыре множителя будут отличаться от четырех предыдущих заменой векторов поляризации $\tilde{\mathbf{e}}_{\pm 1}(\mathbf{k})$ и $\tilde{\mathbf{e}}_{\mp 1}(\mathbf{k})$, задаваемых формулами (8), (9), на соответствующие векторы $\mathbf{e}_{\pm 1}(\mathbf{k})$ и $\mathbf{e}_{\mp 1}(\mathbf{k})$, определяемые формулами (6), (7).

Складывая все 4 слагаемых, согласно формуле (11), получаем волновую функцию в координатном представлении, нормированную на единичную вероятность, описывающую состояние двух запутанных фотонов непосредственно после их вылета из кристалла до момента их разделения, например, по разным волоконным каналам.

Изложенную процедуру построения фолновой функции в координатном представлении состояния двух запутанных фотонов можно, очевидно, обобщить на их произвольное число и использовать для описания интерференции, не прибегая к постулированным амплитудам вероятностей перехода и более детально исследуя возникающие пространственные распределения фотонов.

Библиографический список

1. Davydov A.P., Zlydneva T.P. The Young's interference experiment in the light of the single-photon modeling of the laser radiation // ITSMSSM-2016. P. 208-215. doi: 10.2991/itsmssm-16.2016.100.
2. Davydov A.P., Zlydneva T.P. The Modeling of the Young's interference experiment in terms of single-photon wave function in the coordinate representation // Proc. IV ITSMSSM-2017. 2017. P. 257-265. doi: 10.2991/itsmssm-17.2017.54.
3. Давыдов А.П., Злыднева Т.П. Об интерференции света с точки зрения волновой функции фотона в координатном представлении // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: матер. 75-й межд. науч.-техн. конф. Магнитогорск: Изд-во МГТУ им. Г.И. Носова, 2017. Т. 2. С. 109–112.
4. Давыдов А.П., Злыднева Т.П. Моделирование и анализ волновой функции фотона при квантово-механическом объяснении опыта Юнга // Информационные технологии в моделировании и управлении: подходы, методы, решения: сб. науч. тр. I всерос. науч. конф. Ч.1. Тольятти: Изд. Качалин А.В., 2017. С. 66–74.
5. Давыдов А.П., Злыднева Т.П. Интерференция электромагнитных волн с точки зрения волновой функции фотона в координатном представлении // Электромагнитные волны и электронные системы. 2018. Т. 23. № 8. С. 27–40.
6. Давыдов А.П., Злыднева Т.П. Моделирование классической и квантовой плотностей вероятности обнаружения фотона фемтосекундного лазерного излучения // Физика конденсированного состояния и ее приложения: сб. тр. всерос. науч.-практ. конф. Т. II. Уфа: Изд-во РИЦ БашГУ, 2018. С. 214–220.
7. Давыдов А.П., Злыднева Т.П. Однофотонная интерференция света в терминах волновой функции фотона в координатном представлении // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2019. Т. 10. №1. С. 156–162.
8. Davydov A.P., Zlydneva T.P. On the wave-particle duality within the framework of modeling single-photon interference // J. Phys.: Conf. Ser. Vol. 1399. Pap. 02219. DOI: 10.1088/1742-6596/1399/2/022019.
9. Davydov A.P., Zlydneva T.P. Single- and two-photon interference within the simulated photon wave function in coordinate representation // J. Phys.: Conf. Ser. 2020. Vol. 1679(2). Pap. 022051. doi:10.1088/1742-6596/1679/2/022051.

10. Davydov A.P., Zlydneva T.P. On simulation of the photon wave function to explain the Young's experiment and prospects for its use in quantum cryptography // J. Phys.: Conf. Ser. 2020. Vol. 1661(1). Pap. 012028. doi:10.1088/1742-6596/1661/1/012028.

11. Давыдов А.П. Волновая функция фотона в координатном представлении // Вестник МаГУ. Вып. 5. Естественные науки. Магнитогорск: МаГУ, 2004. С. 235-243.

12. Давыдов А.П. Квантовая механика фотона: волновая функция в координатном представлении // Электромагнитные волны и электронные системы. 2015. Т. 20. № 5. С. 43–61.

13. Давыдов А.П. Волновая функция фотона в координатном представлении: монография. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова. 2015. 180 с.

14. Davydov A P and Zlydneva T P 2016 On the reduction of free photons speed in modeling of their propagation in space by the wave function in coordinate representation 2016 13th International scientific-techn. conf. on actual problems of electronic instrument engineering (APEIE) – 39281 proceedings vol 1 (Novosibirsk) pp 233-240.

15. Давыдов А.П., Злыднева Т.П. Обоснование закона Малюса в рамках квантовой механики фотона // Инженерная физика. 2019. № 7. С. 13-16. doi: 10.25791/infizik.07.2019.759.

16. Давыдов А.П., Злыднева Т.П. Моделирование волновой функции в координатном представлении двух фотонов в запутанном состоянии // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2020. Т.11. № 1. С. 135-140.

17. Davydov A P and Zlydneva T P 2018 Space-Time probability density of detection of a photon in laser beam of the femtosecond range 2018 14th International scientific-technical conf. APEIE – 44894 proceedings vol 1, Part 4 (Novosibirsk) p 58-69.

Сведения об авторах

Давыдов Александр Петрович, канд. физ.-мат. наук, доцент МГТУ им. Г.И. Носова (Магнитогорск). Email: ap-dav@yandex.ru.

Злыднева Татьяна Павловна, кандидат педагогических наук, доцент МГТУ им. Г.И. Носова (Магнитогорск). E-mail: tapazl@yandex.ru.

ТРЕХМЕРНОГО СИММЕТРИЧНОГО ИНТЕГРАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ ТИПА ВОЛЬТЕРРА С СИНГУЛЯРНОЙ ОБЛАСТЕЙ

Изучен новый класс модельных трёхмерных интегральных уравнений вольтерровского типа, симметричный по одному из переменных x , ядро которого имеет граничную и внутреннюю фиксированную сингулярную область.

Ключевые слова: трёхмерное интегральное уравнение, сингулярная область, симметричное уравнение.

TO THEORY ONE CLASS OF SIMMETRICAL THREE DIMENSIONAL MODEL VOLTERRA TYPE INTEGRAL EQUATION SINGULAR DOMAINS

In this work, we investigation one new class of the model three dimensional symmetrical Volterra type integral equations with one boundary and one interior singular domains.

Key words: three dimensional integral equation – singular domains - symmetrical equations.

Через D обозначим

$$D = \{(x, y, z): -a < x < a, 0 < y < b, 0 < z < c\}.$$

Соответственно обозначим

$$D_0^- = \{-a < x < 0, 0 < y < b, 0 < z < c\},$$

$$D_0^+ = \{0 < x < a, 0 < y < b, 0 < z < c\},$$

$$D_1 = \{(x, y): -a < x < a, 0 < y < b, z = 0\},$$

$$D_2 = \{(x, z): -a < x < a, y = 0, 0 < z < c\},$$

$$D_3 = \{(x, z): x = 0, 0 < y < b, 0 < z < c\},$$

$$\Gamma_1 = \{x; -a < x < a, y = 0, z = 0\},$$

$$\Gamma_2 = \{y; x = 0, 0 < y < b, z = 0\},$$

$$\Gamma_3 = \{z; x = 0, y = 0, 0 < z < c\}.$$

В области D рассмотрим трехмерное интегральное уравнение вида

$$\begin{aligned}
& \varphi(x, y, z) + \lambda_1 \int_{-x}^x \frac{\varphi(t, y, z)}{|t|} dt + \lambda_2 \int_0^y \frac{\varphi(x, s, z)}{s} ds + \\
& + \lambda_3 \int_0^z \frac{\varphi(x, y, \tau)}{\tau} d\tau + \mu_1 \int_{-x}^x \frac{dt}{|t|} \int_0^y \frac{\varphi(t, s, z)}{s} ds + \\
& + \mu_2 \int_{-x}^x \frac{dt}{|t|} \int_0^z \frac{\varphi(t, y, \tau)}{\tau} d\tau + \mu_3 \int_0^y \frac{ds}{s} \int_0^z \frac{\varphi(x, s, \tau)}{\tau} d\tau + \\
& + \delta_3 \int_{-x}^x \frac{dt}{|t|} \int_0^y \frac{ds}{s} \int_0^z \frac{\varphi(t, s, \tau)}{\tau} d\tau = f(x, y, z), \quad (1)
\end{aligned}$$

где $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \mu_1, \mu_2, \mu_3, \delta_3$ - заданные постоянные, $f(x, y, z)$ - заданная, $\varphi(x, y, z)$ - искомая функции.

Решение уравнения (1) будем искать в классе функций $\varphi(x, y, z) \in C(\bar{D})$, обращающихся в нуль в особых областях $D_j (1 \leq j \leq 3)$.

Целью настоящей работы явилось изучение уравнения (1), когда коэффициенты этого уравнения связаны определённым образом.

Пусть коэффициенты уравнения (1) между собой связаны равенствами: $\mu_1 = \lambda_1 \lambda_2, \mu_2 = \lambda_2 \lambda_3, \delta_3 = \lambda_1 \mu_3$. Тогда уравнение (1) запишем в виде

$$\begin{aligned}
& \varphi(x, y, z) + \lambda_1 \int_{-x}^x \frac{\varphi(t, y, z)}{|t|} dt + \lambda_2 \int_0^y \left[\varphi(x, s, z) + \lambda_1 \int_{-x}^x \frac{\varphi(t, s, z)}{|t|} dt \right] \frac{ds}{s} + \\
& + \lambda_3 \int_0^z \left[\varphi(x, y, \tau) + \lambda_1 \int_{-x}^x \frac{\varphi(t, y, \tau)}{|t|} dt \right] \frac{d\tau}{\tau} + \\
& + \mu_3 \int_0^y \frac{ds}{s} \int_0^z \left[\varphi(x, s, \tau) + \lambda_1 \int_{-x}^x \frac{\varphi(t, s, \tau)}{|t|} dt \right] \frac{d\tau}{\tau} = f(x, y, z), \quad (2)
\end{aligned}$$

Введем в рассмотрение новую функцию

$$\Omega(x, y, z) = \varphi(x, y, z) + \lambda_1 \int_{-x}^x \frac{\varphi(t, y, z)}{|t|} dt, \quad (3)$$

и приходим к решению модельного двумерного интегрального уравнения вольтеровского типа с сингулярными ядрами вида:

$$\begin{aligned} & \Omega(x, y, z) + \lambda_2 \int_0^y \frac{\Omega(x, s, z)}{s} ds + \lambda_3 \int_0^z \frac{\Omega(x, y, \tau)}{\tau} d\tau + \\ & \mu_3 \int_b^y \frac{ds}{s} \int_c^z \frac{\Omega(x, s, \tau)}{\tau} d\tau = f(x, y, z). \end{aligned} \quad (4)$$

Если в уравнении (4) $\mu_3 = \lambda_2 \lambda_3$, то вводя в рассмотрение новую функцию

$$\Psi(x, y, z) = \Omega(x, y, z) + \lambda_2 \int_0^y \frac{\Omega(x, s, z)}{s} ds, \quad (5)$$

приходим к решению одномерного интегрального уравнения вольтеровского типа:

$$\Psi(x, y, z) + \lambda_3 \int_0^z \frac{\Psi(x, y, \tau)}{\tau} d\tau = f(x, y, z), \quad (6)$$

Таким образом, в случае, когда коэффициенты уравнения (1) между собой связаны, тогда задача о нахождении решения интегрального уравнения (1) сводится к решению трех одномерных интегральных уравнений типов (3), (5) и (6).

Как известно [20], решение уравнения (6) при $\lambda_3 < 0$ и $f(x, y, 0) = 0$ с асимптотическим поведением

$$f(x, y, z) = o[z^{\gamma_1}], \quad \gamma_1 > \lambda_3 \quad \text{при } z \rightarrow 0 \quad (7)$$

дается формулой

$$\Psi(x, y, z) = z^{|\lambda_3|} c_1(x, y) + f(x, y, z) - \lambda_3 \int_0^z \left(\frac{z}{\tau} \right)^{|\lambda_3|} \frac{f(x, y, \tau)}{\tau} d\tau, \quad (8)$$

где $c_1(x, y)$ – произвольная функция точек области D_1 . Если $\lambda_3 > 0$, тогда решение уравнение (6) выражается формулой

$$\Psi(x, y, z) = f(x, y, z) - \lambda_3 \int_0^z \left(\frac{z}{\tau} \right)^{|\lambda_3|} \frac{f(x, y, \tau)}{\tau} d\tau. \quad (9)$$

Решение уравнения (5) при $\lambda_2 < 0$ и $\Psi(x, 0, z) = 0$ с асимптотическим поведением

$$\Psi(x, y, z) = o[y^{\gamma_2}], \quad \gamma_2 > |\lambda_2| \quad \text{при } y \rightarrow 0, \quad (10)$$

выражается формулой

$$\Omega(x, y, z) = y^{|\lambda_2|} c_2(x, z) + \Psi(x, y, z) - \lambda_2 \int_b^y \left(\frac{y}{s} \right)^{|\lambda_2|} \frac{\Psi(x, s, z)}{s} ds, \quad (10^*)$$

где $c_2(x, z)$ произвольная функция точек области D_2 , а при $\lambda_2 > 0$ формулой

$$\Omega(x, y, z) = \Psi(x, y, z) - \lambda_2 \int_b^y \left(\frac{y}{s} \right)^{|\lambda_2|} \frac{\Psi(x, s, z)}{s} ds, \quad (11)$$

Согласно [20], решение уравнения (3) при $\lambda_1 < 0$ и $\Omega(0, y, z) = 0$ с асимптотическим поведением

$$\Omega(x, y, z) = o[x^{\gamma_3}], \quad \gamma_3 > |\lambda_1| \quad \text{при } x \rightarrow 0. \quad (12)$$

выражается формулой

$$\varphi(x, y) = \begin{cases} \Omega(x, y, z) - \lambda_1 K_1^1[\Omega(x, y, z)] & \text{когда, } (x, y) \in D^+ \\ \Omega(-x, y, z) + \lambda_1 K_1^1[\Omega(x, y, z)] & \text{когда, } (x, y) \in D^- \end{cases} \quad (13)$$

где

$$K_1^1[\Omega(x, y, z)] = \lambda_1 \int_0^x \frac{\Omega(x, y, z) + \Omega(-x, y, z)}{|t|} dt,$$

Как следует из формулы (8), асимптотическая формула (10) будет справедливой, если $c_1(0, y) = 0$ со следующим асимптотическим поведением

$$c_2(x, z) = O|x^\delta|, \quad \delta > |\lambda_1| \quad \text{при } x \rightarrow 0 \quad (14)$$

и $f(0, y, z) = 0$ с асимптотическим поведением

$$f(x, y, z) = o[x^{\gamma_3}], \quad \gamma_3 > |\lambda_3| \quad \text{при} \quad x \rightarrow 0. \quad (15)$$

При выполнении всех вышеуказанных условий, в формулу (13) вместо $\Omega(x, y, z)$ подставляя его значение по формуле (10*), затем в полученном выражении вместо $\Psi(x, y, z)$ подставляя его значение по формуле (6.1.6), находим решение уравнение (8) в этом случае при $\lambda_1 < 0, \lambda_2 < 0, \lambda_3 < 0$ в виде

$$\varphi(x, y, z) = \begin{cases} R_\alpha^1[c_1(x, y), c_2(x, z)] + R_\alpha^2[f(x, y, z)], & \text{когда } (x, y) \in D_0^+ \\ R_\alpha^3[c_1(x, y), c_2(x, z)] + R_\alpha^4[f(x, y, z)], & \text{когда } (x, y) \in D_0^- \end{cases}$$

где

$$R_\alpha^1[c_1(x, y), c_2(x, z)], \quad R_\alpha^2[f(x, y, z)], \quad R_\alpha^3[c_1(x, y), c_2(x, z)], \\ R_\alpha^4[f(x, y, z)] -$$

из-

вестные интегральные операторы.

Таким образом, доказано следующее утверждение

Теорема 1. Пусть в уравнение (1)

$$\mu_1 = \lambda_1 \lambda_2, \mu_2 = \lambda_1 \lambda_3, \mu_3 = \lambda_2 \lambda_3, \delta_3 = \lambda_1 \mu_3$$

$\lambda_1 < 0, \lambda_2 < 0, \lambda_3 < 0, \quad f(x, y, z) \in C(\overline{D}), \quad f(0, 0, 0) = 0$ со следующим асимптотическим поведением

$$f(x, y, z) = o[x^{\gamma_3} y^{\gamma_2} z^{\gamma_1}], \quad \gamma_3 > |\lambda_1|, \quad \gamma_2 > |\lambda_2|, \quad \gamma_1 > |\lambda_3|$$

при $(x, y, z) \rightarrow (0, 0, 0)$. Тогда любое решение уравнения (1) из класса $C(\overline{D})$,

обращающихся в нуль на $D_j (1 \leq j \leq 3)$, представимо в виде (7), где

$c_1(x, y), c_2(x, z)$ – произвольные функции областей $D_j (1 \leq j \leq 3)$

обладающие свойствами $c_1(x, y) \in D_1, c_2(x, z) \in D_2, c_1(0, 0) = 0$

с асимптотическим поведением

$$c_1(x, y) = o[x^{\gamma_4} y^{\gamma_5}], \gamma_4 > \lambda_1, \gamma_5 > \lambda_2 \quad \text{при} \quad (x, y) \rightarrow (0, 0)$$

$$c_2(0, 0) = 0$$

с асимптотическим поведением

$$c_2(x, z) = o[x^{\gamma_6} z^{\epsilon}], \quad \gamma_6 > \lambda_1, \quad \epsilon > 0 \quad \text{при} \quad (x, z) \rightarrow (0, 0) \quad (**)$$

Следствие 1.

Как следует из интегрального представления (16), при выполнении всех условий теоремы 1., любое решение уравнения (6.1) из класса $C(\overline{\Omega})$ при $(x, y, z) \rightarrow (0,0,0)$ обращается в нуль со следующим асимптотическим поведением

$$\varphi(x, y, z) = o[x^\varepsilon y^\varepsilon z^\varepsilon], \text{ при } (x, y, z) \rightarrow (0,0,0), \quad (16^*)$$

где ε достаточно малое положительное число.

Как следует из [5], при $\lambda_1 > 0, \lambda_2 > 0, \lambda_3 > 0$ интегральные уравнения (3), (5), (6) имеют единственные решения и их решения выражаются формулами (9), (11), (13). Таким образом, если решение интегрального уравнения (1) в этом случае существует, тогда оно выражается формулой

$$\varphi(x, y, z) = \begin{cases} R_\alpha^2[f(x, y, z)], & \text{когда } (x, y) \in D_0^+ \\ R_\alpha^4[f(x, y, z)], & \text{когда } (x, y) \in D_0^- \end{cases} \quad (17)$$

Решение вида (17) существует, если функция $f(x, y, z) \in C(\overline{D})$, $f(0,0,0) = 0$ со следующим асимптотическим поведением

$$f(x, y, z) = o[x^\varepsilon y^\varepsilon z^\varepsilon], \quad \varepsilon > 0 \text{ при } (x, y, z) \rightarrow (0,0,0), \quad (18)$$

Таким образом, при $\lambda_1 > 0, \lambda_2 > 0, \lambda_3 > 0$ имеет место следующее утверждение

Теорема 2. Пусть в уравнении (1) $\lambda_1 > 0, \lambda_2 > 0, \lambda_3 > 0$, $f(x, y, z) \in C(\overline{D})$, $f(0,0,0) = 0$ с асимптотическим поведением (18). Кроме того, пусть постоянные $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \mu_1, \mu_2, \mu_3, \delta_3$ между собой связаны при помощи равенств $\mu_1 = \lambda_1 \lambda_2, \mu_2 = \lambda_1 \lambda_3, \mu_3 = \lambda_2 \lambda_3, \delta_3 = \lambda_1 \mu_3$. Тогда любое решение уравнения (1) из класса $C(\overline{D})$, обращающихся в нуль на $D_j (1 \leq j \leq 3)$ имеет единственное решение, которое дается формулой (17).

Следствие 2. Как следует из интегрального представления (17), при выполнении всех условий теоремы 2, любое решение уравнения (1) из класса $C(\overline{D})$ при $(x, y, z) \rightarrow (0,0,0)$ обращается в нуль с асимптотическим поведением (16*).

Библиографический список

1. Раджабов Н. Интегральные уравнения типов Вольтерра с фиксированными граничными и внутренними сингулярными и сверхсингулярными ядрами и их приложения. – Душанбе, 2007, 221 с.
2. Раджабов Н., Зарипов С.Б. Двухмерные симметричные интегральные уравнения типа вольтерра с сингулярными и сверхсингулярными линиями LAPLAMBERT Academic Publishing, GERMANY, 2019. – С. 112.
3. Зарипов С.Б. Краевые задач для двумерного интегрального уравнения с сверх - сингулярной линией, симметричное относительно переменного X // Материалы Международной научно-практической конференции “Эпистемологические основания современного образования: актуальные вопросы продвижения фундаментального знания в учебный процесс”. – Воронежский государственный университет. Борисоглебск. 2020. – С. 358-361.

Сведения об авторах

Зарипов Сухроб Бобокулович, кандидат физ.-мат. наук, старший преподаватель кафедры “Высшая математика” Таджикский Технический Университет имени академика М.С. Осими. (Таджикистан, г. Душанбе).

УДК 532.685

Зеленова М.А., Комлев Д.И.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭТАПОВ РЕЛАКСАЦИИ И СТАБИЛИЗАЦИИ ДАВЛЕНИЯ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА ПРИЗАБОЙНУЮ ЗОНУ ПЛАСТА

В данной работе представлена графическая интерпретация полей давления в пласте при импульсном воздействии на призабойную зону с учётом влияния скважины. Определены зоны этапов релаксации и стабилизации при мгновенном отборе в пласте и скважине.

Ключевые слова: фильтрация, пластовое давление, релаксация, стабилизация.

Zelenova M.A., Komlev D.I.

DETERMINATION OF THE STAGES OF RELAXATION AND STABILIZATION OF PRESSURE DURING IMPULSE IMPACT ON THE BOTTOM BOTTOM ZONE OF THE FORMATION

This paper presents a graphical interpretation of the pressure fields in the reservoir under impulse action on the bottomhole zone, taking into account the influence of the well. The zones of the stages of relaxation and stabilization at instantaneous withdrawal in the reservoir and the well have been determined.

Key words: filtration, reservoir pressure, relaxation, stabilization.

Развитие методов прогноза состояния пласта и выбора оптимальных способов увеличения дебита скважин требует совершенствования математических моделей полей давления в скважине и пласте, которые описываются дифференциальным уравнением пьезопроводности в частных производных [1–3]. Разнообразие строения нефтегазовых залежей, способов эксплуатации и конструкций скважин определяет широкий круг задач, большинство из которых исследованы недостаточно. В частности, проблема учета влияния насосного оборудования на поля давления приводит к неклассическим граничным условиям, представленным нелокальными интегро-дифференциальными уравнениями со следами производных из внешних областей. Исследованию фильтрационных полей давления в скважине и пласте при отборе жидкости из скважины с учетом производительности насоса, обеспечивающего отбор посвящено ряд статей [4–7].

Как было отмечено выше, постановка и решение задачи о полях давления в пласте и скважине при отборе с учётом влияния насосного оборудования осуществлены в работах [4–7]. Для случая мгновенного отбора из скважины выражение для функции давления в пласте имеет вид

$$P(r,t) = -\frac{2U}{\pi} \int_0^\infty \exp(-u^2 t) F(r,u) du, \quad (1)$$

$$\text{где } F(r,u) = \frac{J_0(ru)[uY_0(u) - \alpha Y_1(u)] - Y_0(ru)[uJ_0(u) - \alpha J_1(u)]}{[uJ_0(u) - \alpha J_1(u)]^2 + [uY_0(u) - \alpha Y_1(u)]}.$$

Полагая в (1) $r = 1$ получим соотношение для поля давления в скважине. При этом наибольший интерес при импульсном воздействии на

призобойную зону пласта представляет собой время релаксации в течение которого происходит изменение величины давления на 60 % от максимального значения и время стабилизации по истечению которого снижается 90 % всех возмущений. Интервалы зон релаксации и стабилизации при мгновенном отборе в разведочных скважинах содержат информацию о продуктивности залежи и являются важными параметрами.

Для точного определения такого времени целесообразно построить кривую давления, нормированную на величину давления в исследуемой точке на давление в этой же точке в момент времени, когда возмущения были минимальны. Например, в скважине минимальные возмущения наблюдаются в начальный момент времени. Тогда нормированная функция примет вид $\frac{P(1,t)}{P(1,0)}$. На этом же графике строят

прямые соответствующие этапам релаксации и стабилизации. Для отсечения отрезка стабилизации по оси ординат ставят маркер равный 10 % от области значений нормированной функции. График такой функции представлен на рисунке 1. Все расчёты выполнены при следующих значениях безразмерных параметров: $q = -295$, $\alpha = 0.00005292$, которые получены при следующих значениях физических характеристик пласта и скважины: $m = 0.3$; $\mu = 10^{-2}$ Па·с; $\rho = 900$ кг/м³; $\langle k \rangle = 10^{-14}$ м²; $H = 1$ м; $\beta = 10^{-8}$ Н/м²; $r_0 = 0.1$ м; $Q = -1.1 \cdot 10^{-4}$ м³/с.

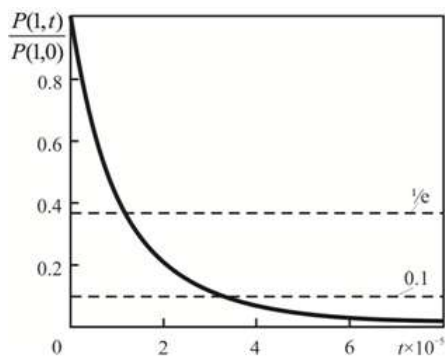


Рис. 1. Кривая релаксации и стабилизации давления в скважине $r = 1$

Из рисунка 1 легко определить диапазон времени релаксации и стабилизации – точки пересечения прямых релаксации и стабилизации с графиком нормированной функции. Масштабируя область пересечения прямой с графиком можно определить время релаксации и стабилизации с высокой точностью.

В литературе даются рекомендации определения времени релаксации при помощи отсечения по оси ординат отрезка $1/e$. Согласно рисунку и вышеизложенному при помощи трассировки или масштабирования можно заключить, что интервал времени релаксации в скважине $r=1$ ($r_d=0.1$ м) составляет $t < 1.17 \cdot 10^5$, а время стабилизации $t > 3.19 \cdot 10^5$. Что с учётом обезразмеривания соответствует $t_d < 3.6 \cdot 10^6$ с и $t_d > 9.57 \cdot 10^6$ с или $t_d < 41$ сут. и $t_d > 11$ сут. Время же в диапазоне $1.17 \cdot 10^5 < t < 3.19 \cdot 10^5$ ($3.6 \cdot 10^6 < t_d < 9.57 \cdot 10^6$ с или $41 < t_d < 111$ сут.) является переходным периодом с этапа релаксации к этапу стабилизации.

Так как во всех точка пласта $r > 1$ в начальный момент времени возмущения отсутствовали, т.е. $P(r,0)=0$, то построить кривую релаксации и стабилизации аналогичную такой кривой для скважины $r=1$ невозможно. Для определения времени релаксации и стабилизации в этом случае необходимо проанализировать время достижения минимума. Это приводит к необходимости дифференцирования выражения функции давления и определения точки её обращения в ноль. После определения времени достижения минимума, определяется нормировочное значение давления $P(r_n, t_n)$, а затем строятся нормированные кривые. Здесь r_n – значение радиальной координаты исследуемой точки, t_n – значение времени в котором функция давления в выбранной точке имеет минимум. Таким образом были построены нормированные кривые для точек $r=10, 50$ и 100 ($r_d=1$ м, 5 м, 10 м) и определены этапы режима релаксации (область расположенная левее точки пересечения нормированной кривой с маркером $1/e$), переходного режима (временной интервал расположенный между областью релаксации и стабилизации) и режима стабилизации (область расположенная правее точки пересечения нормированной кривой с маркером 0.1).

На основании анализа пространственно-временных распределений поля давления установлено что:

– с удалением от оси скважины время достижения максимальных возмущений функции возрастает

$r_d, \text{м}$	0.1	1	5	10
$t_d, \text{с}$	0	2.5(105)	7.5(105)	1.3(106)
$t_d, \text{сут.}$	0	2.9	8.7	15

– с удалением от оси скважины амплитуда возмущений поля давления уменьшается

$r_d, \text{м}$	0.1	1	5	10
$P_d(r_d, t_d), \text{Па}$	1235	611	298.7	193.8

– с удалением от оси скважины время окончания интервала релаксации увеличивается

$r_d, \text{м}$	0.1	1	5	10
$t_d, \text{с}$	3.6(106)	4.95(106)	7.11(106)	9.6(106)
$t_d, \text{сут.}$	41	57	82	111

– с удалением от оси скважины время начала этапа стабилизации увеличивается

$r_d, \text{м}$	0.1	1	5	10
$t_d, \text{с}$	$9.57 \cdot 10^6$	$1.3 \cdot 10^7$	$1.86 \cdot 10^7$	$2.37 \cdot 10^7$
$t_d, \text{сут.}$	111	150	215	274

– с удалением от оси скважины интервал времени переходного этапа (этапа перехода из режима релаксации в режим стабилизации) расширяется и составляет

$r_d, \text{м}$	0.1	1	5	10
$\Delta t_d, \text{с}$	$5.97 \cdot 10^6$	$8 \cdot 10^6$	$1.15 \cdot 10^7$	$1.41 \cdot 10^7$
$\Delta t_d, \text{сут.}$	70	93	133	163

Рассматриваемая задача открывает перспективы для большого объёма исследований, представляющих интерес как для инженеров-геофизиков в ходе разработки месторождений, так и для науки в целом при решении задач подобного типа.

Библиографический список

1. Николаевский В.Н. Механика насыщенных пористых сред / В.Н. Николаевский, К.С. Басниев, А.Т. Горбунов, Г.А. Зотов. М.: Недра, 1970.
2. Чарный И.А. Подземная гидродинамика / И.А. Чарный. М.: Гостопте хиздат, 1963.
3. Маскет М. Течение однородных жидкостей в пористой среде / М. Маскет. М.–Ижевск: ИКИ, 2004.
4. Филиппов А.И., Ахметова О.В., Ковальский А.А., Зеленова М.А. Поле давления в пласте при заданном дебите скважины // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2020. Т. 6. № 3(23). С. 58-78.
5. Филиппов А.И., Зеленова М.А. Релаксационные процессы в скважине после пуска насоса // Инженерная физика. 2020. № 10. С. 17-22.
6. Филиппов А.И., Ахметова О.В., Ковальский А.А., Зеленова М.А. Асимптотическое решение задачи о поле давления в пласте и скважине // Прикладная физика и математика. 2021. № 1. С. 27-37.
7. Филиппов А.И., Ахметова О.В., Ковальский А.А., Зеленова М.А. Моделирование полей давления в нефтеносном пласте с учетом изменения уровня жидкости в скважине // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2021. Т. 7. № 2 (26). С. 95-112.

Сведения об авторах

Зеленова Марина Анатольевна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей и теоретической физики СФ БашГУ. E-mail: marina_ag@inbox.ru.

Комлев Денис Игоревич, магистрант СФ БашГУ. E-mail: den-is404@list.ru.

Зеленова М.А., Мукимов Р.А.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТЕПЕНИ КОРРОЗИИ В ТРУБАХ

С течением времени трубопроводы подвергаются разрушению не зависимо от того из какого материала они выполнены. Контроль за состоянием трубопроводов представляет важнейшую проблему, поскольку их разрешение часто приводит не только к потерям транспортируемых продуктов, но и к экологическим катастрофам. Данная работа посвящена исследованию возможностей использования электрических полей для исследования состояния трубопроводов. На основе созданной экспериментальной установки и проведённых исследований осуществлен качественный анализ возможностей ранней диагностики коррозии трубопроводов автоматизированным резистивным методом.

Ключевые слова: коррозия, метод Кельвина, сопротивление проводника.

Zelenova M.A., Mukimov R.A.

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE DEGREE OF CORROSION IN PIPES

Over time, pipelines are subject to destruction, regardless of what material they are made of. Monitoring the state of pipelines is a major problem, since their resolution often leads not only to losses of transported products, but also to environmental disasters. This work is devoted to the study of the possibilities of using electric fields to study the state of pipelines. On the basis of the created experimental setup and the studies carried out, a qualitative analysis of the possibilities of early diagnostics of pipeline corrosion by an automated resistive method was carried out.

Keywords: corrosion, Kelvin method, conductor resistance.

Во всем мире существует такая проблема, как коррозия трубопроводов. В России из-за этой проблемы страдают как частные, так и государственные компании. На протяжении уже многих лет ведутся различные исследования по борьбе с коррозией в трубах и способами их определения своевременно [1–3].

Одной из наиболее важных особенностей трубопроводов, с точки зрения коррозии, является их большая протяженность. При своей большой протяженности подземные линии проходят через почвы различного состава и строения, различной влажности и аэрации. Все это создает возможность возникновения значительных разностей потенциалов между отдельными частями подземной линии. Так как трубопроводы имеют высокую проводимость, то на них легко образуются коррозионные гальванопары, имеющие иногда протяженность в десятки и даже сотни метров [4].

Коррозия подземных трубопроводов протекает по электрохимическому механизму, базирующемуся на возникновении разности потенциалов между различными участками трубопровода, и, как следствие, возникновении тока коррозии. В результате протекания тока коррозии участки металла на анодных зонах растворяются и переходят в грунт, где впоследствии взаимодействуют с почвенным электролитом, образуя ржавчину.

Так как при этом часто создаются большие плотности тока на анодных участках, это сильно увеличивает скорость коррозии. Существенным для развития коррозии оказывается и то, что подземные линии укладываются на такой глубине, где всегда сохраняется некоторая влажность, обеспечивающая течение коррозионных процессов. На глубине заложения трубопроводов температура редко снижается ниже 0°C и это также способствует коррозии. Благоприятствует развитию коррозии на подземных трубопроводах и наличие на поверхности труб прокатной окалины, которая далеко не всегда удаляется при очистке.

В почве живёт большое количество микроорганизмов, которые также могут вызывать коррозию путём продуцирования веществ, вызывающих коррозию (например, кислот), создавая на поверхности металла условия, которые обуславливают появление на поверхности металла разности потенциалов и образования дополнительных анодных и катодных зон, с дальнейшим протеканием коррозионного процесса по электрохимическому механизму.

Одним из методов своевременного определения коррозионных зон является так называемый метод Кельвина, который заключается в измерении удельного сопротивления исследуемого участка трубы. Ранее автором проекта под руководством доктора физико-математических наук, профессора С.С. Гоц на кафедре физической электроники и нанофизики физико-технического института разрабо-

тано устройство для измерения малого электрического сопротивления на постоянном токе основанного на методе Кельвина. При помощи разработанного устройства проведен автоматизированный эксперимент по определению уровня коррозии металлов. В ходе выполнения эксперимента на основе измерения электрического сопротивления на постоянном токе была исследована проволока толщиной 2 мм и труба диаметром 20 мм, с толщиной 2 мм без зачистки и с зачисткой.

Результаты эксперимента для проволоки толщиной 2 мм представлены в сводной таблице 1. Из таблицы видно, что с уменьшение площади коррозии, удельное сопротивление образца увеличивается. Кроме того, наблюдается зависимость сопротивления от величины силы тока в цепи.

На рисунке 1 представлены диаграммы изменения удельного сопротивления стальной проволоки от длины зачистки в миллиметрах при разных значениях силы тока в цепи.

Таблица 1. Сводные результаты эксперимента для первого образца

Проволока толщиной 2 мм				
Длина зачищенного участка, мм	Сила тока, А	Сопротивление, Ом	Абсолютная случайная погрешность	Относительная случайная погрешность
0	1	$5,52 \cdot 10^{-3}$	$0,06 \cdot 10^{-3}$	1%
5	1	$5,62 \cdot 10^{-3}$	$0,06 \cdot 10^{-3}$	1%
20	1	$5,71 \cdot 10^{-3}$	$0,06 \cdot 10^{-3}$	1%
20	2	$5,57 \cdot 10^{-3}$	$0,05 \cdot 10^{-3}$	1%
50	1	$5,72 \cdot 10^{-3}$	$0,08 \cdot 10^{-3}$	2%
50	2	$5,79 \cdot 10^{-3}$	$0,04 \cdot 10^{-3}$	1%
100	1	$5,78 \cdot 10^{-3}$	$0,08 \cdot 10^{-3}$	2%
100	2	$5,84 \cdot 10^{-3}$	$0,04 \cdot 10^{-3}$	1%



Рис. 1. Диаграмма удельного сопротивления первого образца

Результаты эксперимента для трубы диаметром 20 мм, с толщиной стенки 2 мм представлены в сводной таблице 2.

Таблица 2. Сводные результаты эксперимента для второго образца

Труба диаметром 20 мм, с толщиной стенки 2 мм				
Длина зачищенного участка, мм	Сила тока, А	Сопротивление, Ом	Абсолютная случайная погрешность	Относительная случайная погрешность
0	1	$3,8 \cdot 10^{-4}$	$0,3 \cdot 10^{-4}$	8%
5	1	$4,32 \cdot 10^{-4}$	$0,12 \cdot 10^{-4}$	3%
20	1	$4,36 \cdot 10^{-4}$	$0,24 \cdot 10^{-4}$	6%
50	1	$4,54 \cdot 10^{-4}$	$0,11 \cdot 10^{-4}$	3%
100	1	$4,58 \cdot 10^{-4}$	$0,08 \cdot 10^{-4}$	2%

На рисунке 2 представлена диаграммы изменения удельного сопротивления трубы от длины зачистки.

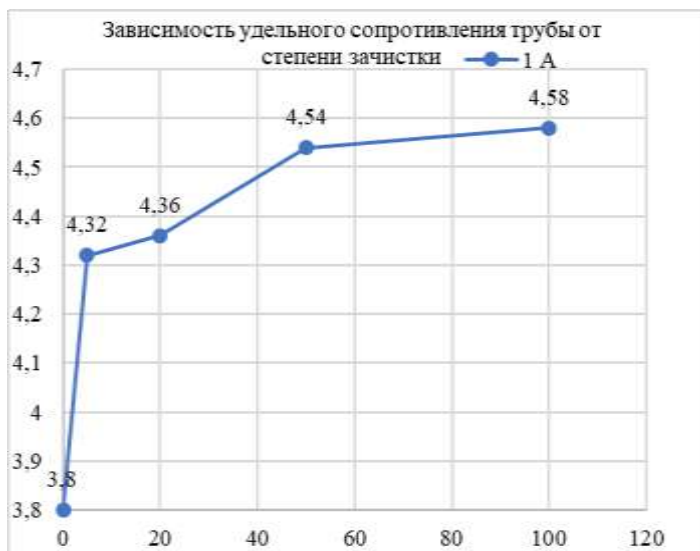


Рис. 2. Диаграмма удельного сопротивления второго образца

На рисунках 1 и 2 прослеживается рост удельного сопротивления обоих образцов с увеличением площади зачистки.

В ходе изучения литературы по теме исследования и проведенного эксперимента были получены следующие результаты:

1. в процессе коррозии металла изменяются электрофизические свойства проводника, в частности его удельное сопротивление;
2. четырехзондовый метод измерения малого электрического сопротивления на постоянном токе (метод Кельвина) позволяет избежать ошибок, вызванных дополнительным сопротивлением провода;
3. точность измерения сопротивления методом Кельвина может быть улучшена путем минимизации потока электронов через вольтметр, что достигается более чувствительным (рассчитанным на малый ток) индикатором и / или потенциометрическим устройством (устройством нулевого баланса);
4. после зачистки участка поверхности экспериментальных образцов от коррозии измеряемое сопротивление возрастает с увеличением длины зачищенного участка.

Своевременное определение зон захваченных коррозий и раннее их устранение способствует сохранности трубопроводов и экономически выгодно.

Библиографический список

1. Сизарёв В.Д., Столотнюк С.В., Лемехов В.В., Сачек Б.Я., Мезрин А.М., Муравьева Т.И., Солдатенков И.А. Трибологические исследования образцов труб парогенератора на фреттинг-коррозию и виброизнос // В сборнике: Годовой отчет НИКИЭТ-2018 Москва, 2018. С. 170–172.
2. Тариков Г.П., Бельский А.Т., Комраков В.В. Исследование влияния положения дополнительной коррозии в элементе трубопровода на величину коэффициента интенсивности напряжений // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого. 2008. № 3–4 (34–35). С. 26–30.
3. Аманбаев Е.Н. Исследование внутренней коррозии трубопроводов: причины возникновения и особенности развития // Механика и технологии. 2017. № 4 (58). С. 110–116.
4. Жук Н.П. Курс теории коррозии и защиты металлов! М.: Металлургия, 1976. – 472 с.

Сведения об авторах

Зеленова Марина Анатольевна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей и теоретической физики СФ БашГУ. E-mail: marina_ag@inbox.ru.

Мукимов Роберт Альбертович, магистрант СФ БашГУ. E-mail: mukimovrobert@yandex.ru.

УДК 523.11

Каримов Р.Х., Измаилов Р.Н.

СТАБИЛЬНОСТЬ ВРЕМЕНИПОДОБНЫХ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ЛИНИЙ ЧЕРНЫХ ДЫР В ТЕОРИИ СТРУН

В работе исследовано влияние магнитного заряда на область стабильности времениподобных геодезических линий в пространстве-времени черной дыры Гиббонса-Маеда-Гарнфизла-Горовица-

Стромингера и показано, что наличие магнитного заряда увеличивает область стабильности.

Ключевые слова: черная дыра, теория струн, магнитный заряд, времениподобные геодезические линии, область стабильности.

Karimov R.Kh., Izmailov R.N.

STABILITY OF TIMELIKE GEODESIC LINES OF BLACK HOLES IN STRING THEORY

The article investigates the influence of a magnetic charge on the stability zone of timelike geodesic lines in the Gibbons-Maeda-Garfinkle-Horowitz-Strominger black hole space-time and shows that the presence of a magnetic charge increases the stability region.

Keywords: black hole, string theory, magnetic charge, timelike geodesic lines, stability zone.

Одной из наиболее подходящей последовательной квантовой теории гравитации является теория струн [1]. Теория струн основана на гипотезе о том, что все элементарные частицы и их фундаментальные взаимодействия возникают в результате колебаний и взаимодействий ультрамикроскопических квантовых струн на масштабах порядка планковской длины 10^{-35} м [2]. Данный подход, с одной стороны, позволяет избежать таких трудностей квантовой теории поля, как перенормировка [3], а с другой стороны, приводит к более глубокому взгляду на структуру материи и пространства-времени.

Квантовая теория струн возникла в начале 1970-х годов в результате осмысления формул Габриэле Венециано [4], связанных со струнными моделями строения адронов. Предсказания теории струн отличаются от предсказаний общей теории относительности, и одной из причин этого различия является наличие скалярного поля, называемого дилатонным, которое может изменять свойства геометрии черных дыр. На сегодняшний день наиболее изученным решением для черных дыр в теории струн является решение Гиббонса-Маеда-Гарнфикла-Горовица-Стромингера (ГМГГС) [5,6]. Это решение было получено в работе Гиббонса и Маеда [5] и, независимо от них, в работе Гарнфикла, Горовица и Стромингера [6]. Пространство-время черной дыры ГМГГС может быть описано как в картине Эйнштейна, так и в картине конформно связанной струны. Поскольку, далее в работе,

будет рассматриваться метрика только в картине струн, принадлежность к картине будет опущена.

Действие метрики ГМГТС имеет вид

$$S = \int d^4x \sqrt{-g} e^{-2\phi} \left[R - 4(\nabla\phi)^2 - F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} \right], \quad (1)$$

где ϕ – дилатонное поле, R – скаляр кривизны Риччи, связанный с метрикой $g_{\mu\nu}$, а $F_{\mu\nu}$ – электромагнитное поле Максвелла. Элемент линии, представляющий 4-мерную магнитно заряженную дилатонную черную дыру ГМГТС, задается выражением

$$d\tau_{\text{Mag}}^2 = - \left(1 - \frac{2M}{r} \right) \left(1 - \frac{Q_M^2}{Mr} \right)^{-1} dt^2 + \left[\left(1 - \frac{2M}{r} \right) \left(1 - \frac{Q_M^2}{Mr} \right) \right]^{-1} dr^2 + r^2 d\Omega^2, \quad (2)$$

где M – масса черной дыры и Q_M – магнитный заряд. Электромагнитное поле Максвелла задается в виде

$$F = Q_M \sin\theta d\theta \wedge d\phi \quad (3)$$

и дилатонное поле определяется как

$$e^{-2\phi} = e^{-2\phi_0} \left(1 - \frac{Q_M^2}{Mr} \right), \quad (4)$$

где ϕ_0 – асимптотическое значение дилатонного поля. Поскольку в работе рассматриваются только асимптотически плоские случаи черных дыр, то $\phi_0 \equiv 0$. Дилатонный заряд заряженной черной дыры определяется по формуле

$$D = - \frac{Q_M^2}{2M} \quad (5)$$

где D не является новым свободным параметром метрики (2), поскольку, асимптотическое значение дилатонного поля ϕ фиксируется, определяется через M и Q_M и всегда отрицателен. Как было показано в работе [7] магнитный заряд Q_M имеет предельное значение $\sqrt{2}M$, в котором метрика описывает уже не черную дыру, а кротовую нору.

Далее в работе будут проанализированы времениподобные геодезические круговые линии черной дыры ГМГТС с помощью метода Кардосо и соавт., предложенного в работе [8]. Ограничимся рассмот-

рением экваториальных орбит метрики (2), лагранжиан которых равен

$$2\mathbf{L} = -\left(1 - \frac{2M}{r}\right) \left(1 - \frac{Q_M^2}{Mr}\right)^{-1} \dot{t}^2 + \left[\left(1 - \frac{2M}{r}\right) \left(1 - \frac{Q_M^2}{Mr}\right)\right]^{-1} \dot{r}^2 + r^2 \dot{\varphi}^2 \quad (6)$$

Обобщенные импульсы, полученные из этого лагранжиана, равны

$$p_t = -\left(1 - \frac{2M}{r}\right) \left(1 - \frac{Q_M^2}{Mr}\right)^{-1} \dot{t} \equiv -E = \text{const}, \quad (7)$$

$$p_\varphi = r^2 \dot{\varphi} \equiv L = \text{const}, \quad (8)$$

$$p_r = \left[\left(1 - \frac{2M}{r}\right) \left(1 - \frac{Q_M^2}{Mr}\right)\right]^{-1} \dot{r}. \quad (9)$$

Поскольку лагранжиан (6) не зависит ни от t , ни от φ , следует, что p_t и p_φ – два интеграла движения. Решая систему уравнений (7) и (8) относительно $\dot{t}$ и $\dot{\varphi}$, получаем

$$\dot{\varphi} = \frac{L}{r^2}, \quad \dot{t} = \left(1 - \frac{2M}{r}\right)^{-1} \left(1 - \frac{Q_M^2}{Mr}\right) E \quad (10)$$

Гамильтониан задается формулой

$$\begin{aligned} 2\mathbf{H} &= 2(p_t \dot{t} + p_\varphi \dot{\varphi} + p_r \dot{r} - \mathbf{L}) \\ &= -E \dot{t} + L \dot{\varphi} + \left[\left(1 - \frac{2M}{r}\right) \left(1 - \frac{Q_M^2}{Mr}\right)\right]^{-1} \dot{r}^2 = \delta_1 = \text{const}. \end{aligned} \quad (11)$$

Здесь $\delta_1 = 1, 0$ для времениподобных и изотропных геодезических соответственно. Подставив выражения (10) в уравнение (11) и используя определение эффективного потенциала, т.е. $\dot{r}^2 = V_r$, получаем

$$V_r = \left(1 - \frac{2M}{r}\right) \left(1 - \frac{Q_M^2}{Mr}\right) \left[\left(1 - \frac{2M}{r}\right)^{-1} \left(1 - \frac{Q_M^2}{Mr}\right) E^2 - \frac{L^2}{r^2} - \delta_1\right]. \quad (12)$$

При $Q_M = 0$ уравнение (12) сводится к эффективному потенциалу Шварцшильда.

Далее в работе будут рассматриваться только времениподобные геодезические линии, для которых $\delta_1 = 0$. Используя условия существования круговых геодезических орбит $V_r = 0$ и $V'_r = 0$, получаем, что для черной дыры ГМГГС

$$E^2 = \frac{2M(r-2M)^2}{2M(r^2 + 2Q_M^2) - r(6M^2 + Q_M^2)}, \quad (13)$$

$$L^2 = \frac{r^3(2M^2 - Q_M^2)}{2M(r^2 + 2Q_M^2) - r(6M^2 + Q_M^2)}. \quad (14)$$

Поскольку энергия должна быть реальной, требуется, чтобы знаменатель уравнения (13) был строго положительным, откуда получаем

$$r > \frac{M}{4} \left(6 + \frac{Q_M^2}{M^2} + \sqrt{36 - \frac{20Q_M^2}{M^2} - \frac{Q_M^4}{M^4}} \right). \quad (15)$$

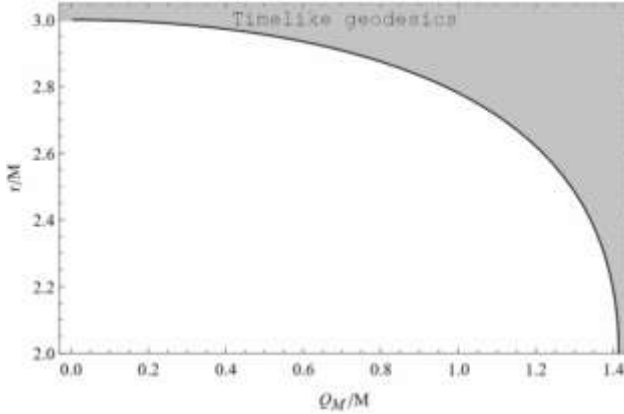


Рис. 1. Область стабильных времениподобных геодезических линий.

На рис. 1 представлен график зависимости безразмерного радиуса r/M , заданного уравнением (15), в зависимости от безразмерного магнитного заряда Q_M/M определенного в промежутке $[0, \sqrt{2}]$. Как видно из рис. 1 область стабильности радиуса времениподобных геодезических линий увеличивается с увеличением заряда. В предельном случае, наименьший радиус совпадает с горизонтом событий, что го-

ворит о том, что все геодезические линии, в этом случае, являются стабильными.

Таким образом наличие магнитного заряда в черных дырах ГМГТС приводит к увеличению области стабильности времениподобных геодезических линий. Наибольшая область стабильности достигается при $Q_M = 2M$.

Библиографический список

1. Scherk J., Schwarz J. Dual Models for Non-Hadrons // Nuclear Physics B. 1974. Vol. 81. P. 118-144.
2. Becker K., Becker M., Schwarz J. String theory and M-theory: A modern introduction // Cambridge University Press. 2007.
3. Морозов А.Ю. Теория струн – что это такое? // Успехи физических наук. 1992. Т. 162, № 8. С. 83-175.
4. Veneziano G. Construction of a crossing-symmetric, Regge-behaved amplitude for linearly rising trajectories // Il Nuovo Cimento A. 1968. Vol. 57. P. 190–197.
5. Gibbons G.W., Maeda K. Black holes and membranes in higher-dimensional theories with dilaton fields // Nuclear Physics B. 1988. Vol. 298. P. 741-775.
6. Garfinkle D., Horowitz G.T., Strominger A. Charged black holes in string theory // Physical Review D. 1991. Vol. 43. P. 3140-3143.
7. Karimov R.Kh. et. al. Accretion disks around the Gibbons–Maeda–Garfinkle–Horowitz–Strominger charged black holes // The European Physical Journal C. 2018. Vol. 78. P. 788.
8. Cardoso V. et. al. Geodesic stability, Lyapunov exponents, and quasinormal modes // Physical Review D. 2009. Vol. 79. P. 064016.

Сведения об авторах

Каримов Рамис Хамитович, ассистент кафедры физики и нанотехнологий, БГПУ им. М.Акумлы (Уфа), E-mail: karimov_ramis_92@mail.ru.

Измаилов Рамиль Наильевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики и нанотехнологий, БГПУ им. М.Акумлы (Уфа), E-mail: izmailov.ramil@gmail.com.

Кожанов А.И., Сафиуллова Р.Р.

ОБРАТНЫЕ ЗАДАЧИ ДЛЯ ПСЕВДОГИПЕРБОЛИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ ЧЕТВЕРТОГО ПОРЯДКА

В работе приведены результаты исследования обратных задач для псевдогиперболического уравнения. В задаче ищется решение псевдогиперболического уравнения, а также неизвестный коэффициент.

Ключевые слова: псевдогиперболическое уравнение, неизвестный коэффициент, обратные задачи, регулярные решения, существование, интегральные условия переопределения.

Kozhanov A.I., Safiullova R.R.

INVERSE PROBLEMS FOR THE FOURTH ORDER PSEUDOHYPERBOLIC EQUATIONS

This paper presents the results of researching of the inverse problem for the pseudohyperbolic equation. We search a decision of the equation and the unknown coefficient.

Keywords: Pseudohyperbolic equation, unknown coefficient, inverse problems, regular solutions, existence, integral conditions.

В цилиндрической области $Q = \Omega \times (0, T)$ (Ω -- ограниченная область из пространства R^n , T -- положительное число) изучается разрешимость нелинейных обратных задач определения решения $u(x, t)$ и неизвестного положительного параметра a в уравнении

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2}(u - \Delta u) - Bu + au = f(x, t)$$

(Δ -- оператор Лапласа, действующий по пространственным переменным, B -- эллиптический оператор второго порядка, также действующий по пространственным переменным). В качестве условия переопределения предполагается использовать условие квадратичного финально-интегрального переопределения. Для изучаемых задач доказываются теоремы существования регулярных (имеющих все обобщенные по С.Л. Соболеву производные, входящие в уравнение)

решений. Приводятся также некоторые обобщения полученных результатов. Подобные задачи стали изучаться сравнительно недавно [1] – [4], для псевдогиперболических уравнений они ранее вообще не изучались.

Библиографический список

1. Lorenzi A., Mola G. Identification of a real constant in linear evolution equation in a Hilbert spaces // Inverse Problems Imaging. 2011. vol. 5, no. 3, pp. 695-714.
2. Kozhanov A.I. Inverse problems of Finding of Absorbtion Parameter in the Diffusion Equation // Math. Notes. 2019. vol. 106, pp. 378-389.
3. Lyubanova A.S. Identification of a Constant Coefficient in an Elliptic Equation // Appl. Anal. 2008. vol. 87, pp. 1121-1128.
4. Kozhanov A.I. Hyperbolic Equations with Unknown Coefficients // Symmetry. 2020. vol. 12, pp. 1-18.

Сведения об авторах

Кожанов Александр Иванович, доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник института математики им. С.Л. Соболева СО РАН (Новосибирск). E-mail: kozhanov@math.nsc.ru.

Сафиуллова Регина Рафаиловна, кандидат физико-математических наук, доцент УГАТУ (Уфа). E-mail: regina-saf@yandex.ru.

УДК 622.276

Кондрашев О.Ф.

ВЯЗКОУПРУГАЯ МОДЕЛЬ ТЕЧЕНИЯ БЕЗГЛИНИСТЫХ БУРОВЫХ РАСТВОРОВ

В работе приведены результаты фильтрационных и микрореологических (в порах микронного размера) исследований биополимерных растворов без твердой фазы, подтверждающие их вязкоупругий характер движения в пористой среде.

Ключевые слова: антифильтрационные и водоизолирующие свойства, вязкопластичная и вязкоупругая модели, граничный слой, затухание фильтрации, кривая течения, разрыв сплошности.

Kondrashev O.F.

VISCOELASTIC MODEL OF THE FLOW OF CLAY-FREE DRILLING FLUIDS

The paper presents the results of filtration and microrheological (in micron-sized pores) studies of biopolymer solutions without a solid phase, confirming their viscoelastic nature of movement in a porous medium

Keywords: anti-filtration and water-filtering properties, viscoplastic and viscoelastic models, boundary layer, filtration attenuation, flow curve, discontinuity

Информация о физических свойствах бурового раствора на всех технологических этапах позволяет в полной мере использовать уникальные свойства высокомолекулярных соединений для их адаптации к конкретным геолого-техническим условиям.

Однако, в отличие от трубной гидравлики, в ее подземной составляющей еще остается много вопросов. К примеру, известно несколько моделей течения высокомолекулярных флюидов, где затухание фильтрации, увеличивающееся фильтрационное сопротивление связывается с наличием малопроницаемой пленки в живом сечении [1] или граничных (адсорбционно-сольватных) слоев на стенках пор [2], или с проявлением вязкоупругих эффектов из-за быстрых деформаций в сужениях-расширениях пор [1].

Во многих случаях (водоизоляция, вскрытие-освоение пластов и т.п.) принципиально важна объективность представлений о характере продвижения полимеров в пористой среде, на основе которых выбираются и модель течения, и соответствующие технологические мероприятия, которые, в конечном итоге, определяют их эффективность и сохранность коллекторских свойств приствольной области.

Однако, выбор и привязка нужной модели течения высокомолекулярного флюида в подземных условиях в настоящее время не может быть осуществлен стандартными средствами буровой реометрии, адаптированными для растворов предыдущего поколения [2, 3].

Фильтрационные эксперименты, проводимые при тестировании новых растворов в отсутствии порометрических характеристик кернов, дают интегральные показатели процесса, не раскрывая специфики продвижения высокомолекулярных соединений в поровых каналах разной величины и природы. Отсутствие подобной информации увеличивает трудоемкость новых разработок и адаптацию их к промышленным условиям.

В связи с этим, для определения модели течения и ее количественных показателей исследования специфики продвижения высокомолекулярной технологической жидкости в УГНТУ по заданию разработчика буровых растворов – БашНИПИнефти были проведены исследования физического состояния разрабатываемых жидкостей по оригинальной методике и их течения в модели порового канала - узких зазорах микронной величины для [2,3].

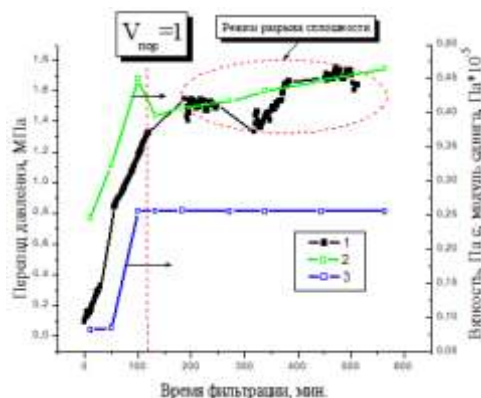


Рис. 1 Зависимость давления фильтрации (1), вязкости (2) и модуля сдвига (3) в узком зазоре 5 мкм

Сопоставление в реальном режиме времени микрореологических (структурно-механические свойства в узких зазорах микронной величины) и фильтрационных измерений на автоматизированной установке FDCE (рис. 1) позволяет сделать однозначный вывод о поверхностной природе изучаемых явлений: синхронное изменение проницаемости и вязкости прямо указывает на контактное взаимодействие жидкости и породы, как причины рассматриваемых аномалий.

Динамика структурно-механических параметров отображает особенности формирования надмолекулярной структуры в граничном (пристенном) слое; вначале на активных центрах твердого тела закрепляются боковые звенья полимера и, как следствие возникающей первичной структуры, кратно возрастает динамическая вязкость и проявляются упругие свойства, не свойственные жидкости в свободном объеме и не обнаруживаемые методами буровой реометрии. На следующем этапе структурообразования продолжительностью до часа, идет

достройка структуры пристенного граничного слоя за счет усиления электростатического взаимодействия боковых звеньев, сопровождающаяся резким ростом структурочувствительных параметров.

Необходимо подчеркнуть, что этот механизм фильтрации, обусловленный образованием адсорбционно-сольватных слоев нефти на поверхности поровых каналов, снижающих фильтрационных характеристики кернов, впервые был описан П. А. Ребиндером [4]. Естественно, что в случае высокомолекулярных флюидов, где размеры граничных слоев могут достигать единиц и десятков мкм [5], наблюдаемые аномалии должны быть более выраженными.

В нашем случае это проявляется в аномально высокой величине поровой вязкости, на порядок превышающей значения, полученные по стандартной методике ($\sim 24 \text{ мПа}\cdot\text{с}$) и возникновению сдвиговой упругости.

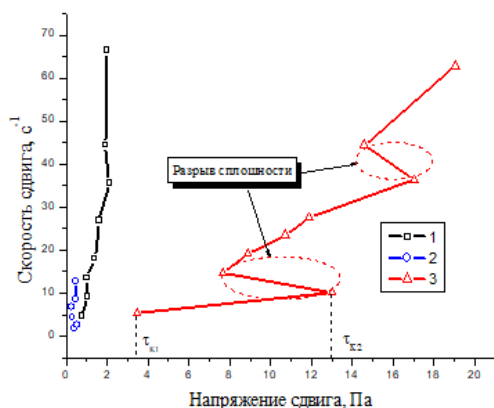


Рис. 2. Кривые течения биополимерного раствора в узком зазоре 26 (2), 15 (2) и 2 (3) мкм

Еще более интересные результаты, уточняющие специфику физического состояния высокомолекулярных растворов в поровом пространстве и их движения, были получены при анализе их течения (рис. 2). Как видно, приведенная зависимость принципиально отличается от вязкопластичной модели наличием фрагментов кривой с отрицательным углом наклона, где реализуется режим разрыва сплошности, в котором скорость возрастает при уменьшении напряжения и наблюдаемый обычно в концентрированных растворах полимеров и

их расплавах [5]. Из приведенных данных четко виден вклад контактного взаимодействия в реологические аномалии, которые резко усиливаются с уменьшением узкого зазора.

Прикладное значение явления разрыва сплошности состоит в существенном усилении изолирующих свойств бурового раствора, поскольку критический перепад давления в момент разрыва континуума локализуется во входной зоне порового канала и не распространяется на остальной объем поровой жидкости, которая фактически остается под действием существенно меньших, докритических давлений [5]. Описываемый эффект выполняет здесь функции предохранительного клапана, сбрасывающего излишнее давление, поэтому структурно-механический барьер, создаваемый вязкоупругим фильтратом, будет по-прежнему обеспечивать функциональные характеристики растворов и при сверхкритических градиентах. Надмолекулярная структура вязкопластичной жидкости в этих условиях необратимо разрушается, теряя свои физические свойства и способствуя тем самым прорыву фильтрата или пластовых вод.

Важно подчеркнуть, что из показанной выше синхронности микрореологических и фильтрационных измерений (см. рис. 1), следует возможность определения режима разрыва сплошности и в фильтрационном эксперименте по пульсациям давления в квазиустановившемся режиме фильтрации (выделено пунктиром).

Резюмируя изложенное, следует подчеркнуть, что информация о физическом состоянии флюидов, специфике течения полимерных растворов в подземных условиях позволяет снизить расход дорогостоящих компонентов технологических жидкостей за счет учета контактного взаимодействия, сократить сроки их разработки из-за снижения объема длительных фильтрационных испытаний и обеспечить более глубокую адаптацию к геолого-техническим условиям объекта воздействия.

Библиографический список

1. Рябченко В.И. Управление свойствами буровых растворов. – М.: Недра, 1990. 230 с.
2. Кондрашев О.Ф., Шарипов А.У. Модификация структурно-механических свойств полимеров в пористой среде. – М.: Геоинформак, 2000. 56 с.
3. Андросон Б.А., Гибадуллин Н.З., Гилязов Р.М., Кондрашев О.Ф. Физико-химические основы применения безглинистых по-

лисахаридных растворов для заканчивания скважин. – Уфа: Изд-во «Монография». 2004. 250 с.

4. Ребиндер П.А. Поверхностные явления в дисперсных системах. Физико-химическая механика. – М.: Наука, 1979, с. 384 .

5. Виноградов В.Г., Малкин А.Я. Реология полимеров. – М.: Химия, 1977. 440 с.

Сведения об авторе

Кондрашев Олег Федорович, доктор технических наук, профессор УГНТУ (Уфа). E-mail: kondr_of@mail.ru.

УДК 538.931

**Курбангулов А.Р., Биккулова Н.Н., Якшибаев Р.А.,
Акманова Г.Р., Сафаргалиев Д.И.**

МЕХАНИЗМ ИОННОГО ПЕРЕНОСА В ХАЛЬКОГЕНИДАХ МЕДИ И СЕРЕБРА

В работе рассмотрен механизм ионного переноса в халькогенидах меди и серебра.

Ключевые слова: суперионные проводники, ионный перенос, халькогениды меди и серебра

**Kurbangulov A.R., Bikkulova N.N., Yakshibaev R.A.,
Akmanova G.R., Safargaliev D.I.**

THE MECHANISM OF IONIC TRANSFER IN COPPER AND SILVER CHALCOGENIDES

The paper considers the mechanism of ion transfer in copper and silver chalcogenides.

Key words: superionic conductors, ion transport, chalcogenides of copper and silver.

Проведено большое количество исследований по изучению явлений ионного переноса в халькогенидах меди и серебра. В работах [1, 2] предложена модель «гусеничного» механизма диффузии, которая хорошо описывается теоретической моделью диффузии ионов [3]. В работе [4] изучена самодиффузия ионов Ag^+ в селениде серебра α -

Ag_2Se методом радиоактивных изотопов. С помощью прыжковой модели описана диффузия катионов Ag в халькогенидах серебра [5]. В этой модели объясняется отклонение от соотношения Эйнштейна $D = \mu k_B T$, где μ - ионной подвижность, D - коэффициент диффузии, появлением дополнительной зависимостью от температуры. Полученные результаты объясняют экспериментальные данные для Ag_2S и Ag_2Se . При этом отсутствие заметного отклонения от соотношения Эйнштейна в Ag_2Te объясняется возможной компенсацией эффекта за счет совместного действия электронов и дырок.

Для моделирования диффузии катионов в $\alpha\text{-Ag}_2\text{Te}$ был применен метод молекулярной динамики (МД) в работе [6]. С помощью данного метода рассчитаны частоты прыжков Ag^+ между тетраэдрическими и октаэдрическими положениями, корреляционный фактор f , учитывающий согласованность прыжков. Также показано, что вероятность обратного прыжка вслед за данным из всех возможных в силу свойств симметрии является наибольшей и падает с повышением температуры, которая варьировалась в интервале 550-1000 К. При этом величина f и среднеквадратичная длина прыжка возрастают. При высоких температурах величина среднеквадратичной длины прыжка приближается к расстоянию между тетраэдрическими и октаэдрическими положениями.

В работах [7, 8] значительное отклонение от соотношения Эйнштейна между ионной подвижностью μ и коэффициентом диффузии D иона серебра в $\alpha\text{-Ag}_2\text{Te}$ также объясняется с помощью модели «гусеничного» механизма. В данной модели ионный перенос осуществляется коррелированными прыжками нескольких подвижных ионов одного за другим. Расчет вероятностей прыжков Ag^+ между тетраэдрическими и октаэдрическими позициями в $\alpha\text{-Ag}_2\text{Te}$ методом МД позволяет выделить из D как одночастичный, так и коллективный вклад [7]. Вклад последнего в ионный перенос падает с повышением температуры. В работе [8] показано, что с ростом температуры возрастает доля одночастичного вклада в полную диффузию и уменьшается коллективный вклад. В работе [8] с помощью метода МД показано, что переход катионов из одной тетраэдрической позиции в другую осуществляется через октаэдрические позиции. Вероятность попарных движений ближайших катионов в одну сторону больше, чем в разные, и обратно пропорциональна росту T . Результаты данной работы хорошо согласуются с «гусеничным» механизмом ионного переноса в $\alpha\text{-Ag}_2\text{Te}$.

Исследованию химической диффузии и самодиффузии катионов в халькогенидах меди и серебра посвящено немало работ. Йокотой была разработана феноменологическая теория химической диффузии в данных соединениях [9]. У халькогенидов серебра значения коэффициентов химической диффузии $\tilde{D}$ почти на порядок выше, чем у халькогенидов меди. Коэффициент химической диффузии у всех бинарных халькогенидов $\tilde{D}$ монотонно убывает с отклонением от стехиометрии [3,10,11].

В работе [12] предложена модель, качественно описывающая зависимости коэффициентов химической диффузии $\tilde{D}$ и ионной проводимости $\sigma_i(x)$ от степени нестехиометричности x . Получено, что доля подвижных катионов составляет 1/8 от общего числа катионов. Ионная проводимость осуществляется катионами, которые слабо связаны с анионами, образующими кристаллическую решетку. Данная модель не в состоянии объяснить экспериментальные результаты, полученные на монокристаллических образцах

Cu_{2-x}X ($\text{X}=\text{S}, \text{Se}$). Для описания экспериментальных данных предложена модель разупорядочения [12], согласно которой четыре катиона и четыре аниона образуют структуру цинковой обманки и не принимают участия в ионной проводимости. Оставшиеся четыре катиона для стехиометрических составов статистически распределены по позициям, образованным данной структурой. Три катиона, которые не принимают участия в ионном переносе, занимают энергетически выгодные 4d позиции, а один катион находится в позициях, по которым осуществляется перенос. Число катионов, принимающих участие в ионном переносе, определяется следующим выражением:

$$n_i = (0.25 - x) \frac{N_a}{V_m} \quad (1)$$

и составляет 1/8 от общего числа катионов меди для стехиометрических составов Cu_{2-x}S и Cu_{2-x}Se . В случае нестехиометрического состава с ростом температуры часть катионов из энергетически выгодных 4d позиций переходят в позиции, по которым происходит ионный перенос. Число таких катионов определяется выражением:

$$n_i^T = x \cdot \frac{N_a}{V_m} \cdot \exp\left(-\frac{E_n}{kT}\right) \quad (2)$$

где E_n - энергия термической активации катионов в позициях, по которым осуществляется ионный перенос.

Модель разупорядочения количественно описывает экспериментальные результаты по ионной проводимости и диффузии в монокристаллах Cu_{2-x}X ($\text{X}=\text{S}, \text{Se}$).

Анализ рассмотренных моделей ионного переноса указывает на отсутствие единой теории, объясняющей явления в суперионных проводниках. Существующие модели обращают внимание преимущественно на ионную подсистему, не принимая во внимание ангармонизм колебаний атомов.

Работа подготовлена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-32-90216.

Библиографический список

1. Schommers W. Structure and dynamics of superionic conductor // Phys. Rev. B. 1980. V.21. №2. P.847-851.
2. Okazaki H. Deviation from the Einstein Relation in Aerage Crystal Self-Diffusion of Ag^+ - Ions in $\alpha\text{-Ag}_2\text{S}$ and $\alpha\text{-Ag}_2\text{Se}$ // J. Phys. Soc. Japan. 1967. V. 23. № 2. P.355-360.
3. Aniya M., Wakamura K. Phonons and the mechanism of ion transport in some superionic conductors // Physica B. 1996. V. 220. P.463-465.
4. Shawky M. Diffusion and Ionic Conductivity of Silver in Alpha-Silver Selenide // Z. Metallik. 1983. V. 74. № 3. P.188-190.
5. Tomoyose T. On deviation from the Einstein relation in silver chalcogenides // J. Phys. Soc. Japan. 1985. V. 54. № 11. P.4232-4235.
6. Tachibana F., Kobayashi M., Okazaki H. Correlation factor of silver ion in $\alpha\text{-Ag}_2\text{Te}$ by molecular dynamics method // Solid State Ionics. 1980. V.35. № 3-4. P.349-353.
7. Tomari T., Kobayashi M., Okazaki H. Caterpillar motion of silver ions in $\alpha\text{-Ag}_2\text{Te}$ Solid State Ionics. 1989. V.35. № 3-4. P. 355-358.
8. Kobayashi, M. Caterpillar motion in $\alpha\text{-Ag}_2\text{Te}$ // SSI. 1990. V.40. № 1. P.300-302.
9. Yokota I. On the Theory of Mixed Conduction with Special Reference to the Conduction in Silver Sulfide Group Semiconductors // J. Phys. Soc. Japan. 1961. V. 16. № 11. P.2213-2226.
10. Якшибаев Р.А., Балапанов М.Х., Конев В.Н. Ионная проводимость и диффузия в суперионном проводнике Cu_2S // ФТТ. 1986. Т. 28. № 5. С.1566-1568.

11. Конев В.Н., Чеботин В.Н., Фоменков С.А. Диффузионные явления в нестехиометрических сульфиде и селениде меди // Изв. АН СССР. Неорган. матер. 1985. Т. 21. № 2. С.205-209.

12. Kadrgulov R.F., Yakshibaev R.A., Khasanov M.A. Phase relations, ionic conductivity and diffusion in the alloys of Cu₂S and Ag₂S mixed conductors // Ionics. 2001. V.7. № 1, 2. P.156-160.

Сведения об авторах

Курбангулов Азат Рифкатович, старший преподаватель кафедры общей и теоретической физики Стерлитамакского филиала БашГУ, E-mail: azatkurbanstr@mail.ru.

Биккулова Нурия Нагимьяновна, доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой общей и теоретической физики Стерлитамакского филиала БашГУ, E-mail: bickulova@mail.ru.

Якшибаев Роберт Асгатович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры общей физики физико-технического института БашГУ, E-mail: yakshibaev5252@mail.ru.

Акманова Гузель Рифкатовна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей физики физико-технического института БашГУ, E-mail: grakmanova@mail.ru.

Сафаргалиев Данир Ильдарович, аспирант кафедры общей физики физико-технического института БашГУ, E-mail: danirsafargaliev@gmail.com.

УДК 681.518

Левина Т.М.

ОПТОВОЛОКОННЫЕ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МНОГОФАЗНЫХ ФЛЮИДОВ В ПРОЦЕССЕ БУРЕНИЯ СКВАЖИН

Проведено сравнение оптоволоконных систем контроля параметров: температуры, скоростного потока многофазных флюидов в процессе бурения скважины. Сформулированы два фактора важных при проектировании оптоволоконных систем контроля физических параметров многофазных флюидов

Ключевые слова: оптоволоконные системы, температура, скоростной поток, многофазный флюид, контроль, измерения

Levina T.M.

OPTICAL FIBER SYSTEMS FOR CONTROL OF PHYSICAL PARAMETERS OF MULTIPHASE FLUIDS IN THE PROCESS OF DRILLING WELLS

Comparison of fiber-optic systems for monitoring parameters: temperature, high-speed flow of multiphase fluids during well drilling. Two factors are formulated that are important in the design of fiber-optic systems for monitoring the physical parameters of multiphase fluids.

Keywords: fiber optic systems, temperature, speed flow, multiphase fluid, control, measurement

Развитие современных оптоволоконных систем, средств измерений физических величин в нефтяных скважинах приводит к кардинальным переменам в процессе разработки месторождений нефти и газа. Исследования и разработки подобных систем в России изменяет подход от технологий единичных периодических измерений к непрерывному мониторингу динамики промысловых и геофизических параметров [1]. Это в свою очередь связано с качественными и эксплуатационными показателями оптического волокна: широкая пропускная способность (до нескольких терагерц); высокая диэлектрическая составляющая; малые оптические потери (до 0,2 дБ/км для кварцевых ВС); линейность $\pm 0,1\%$; высокая коррозионная стойкость ($n\text{-p } \text{B}_2\text{O}_3 < 17\%$) [2].

Кроме того, типовые измеряемые величины – температура, скоростного потока многофазного флюида в скважине описываются более 100 различными методиками их контроля в оптоволоконных системах. Чтобы применять различные методики контроля, необходимо понять физические принципы, на которых эти системы основаны.

Так например, при измерении температуры в скважине можно использовать оптоволоконную систему, описанную в трудах исследований проводимых в Уфимском государственном авиационном техническом университете [3]. Аналитическая зависимость, связывающая мощность оптического излучения на выходе оптического волокна (ОВ) от температуры объекта измерения, ослабляющих свойств атмосферы, материала и типа ОВ, параметров приемной оптической системы представлена выражением:

$$P = \varepsilon_{\lambda} \cdot \chi_{\text{сис}} \cdot \tau \cdot (NA)^2 \cdot \frac{\pi d_f^2}{4} C_1 \lambda^{-5} / [\exp(C_2 / \lambda T) - 1] \cdot \Delta \lambda, \quad (1)$$

где P – мощность оптического излучения на выходе [Вт]; ε_λ – монохроматический коэффициент излучения объекта; NA – числовая апертура ОВ; d_f – диаметр ОВ [м]; C_1, C_2 – постоянные коэффициенты, связывающие физические константы (постоянную Планка, постоянную Больцмана, скорость света в вакууме): $C_1=3,7413 \cdot 10^{-16}$ [Вт·м²]; $C_2=1,4388 \cdot 10^{-2}$ [м·К]; λ – эффективная длина волны пропускания интерференционного фильтра [м]; $\Delta\lambda$ – ширина пропускания интерференционного фильтра [м]; T – температура объекта [К].

Проектирование оптоволоконной системы расходомеров требует понимание предметной области классической динамики и термодинамики скважин, а также нефтегазовой гидродинамики, выделение понятий: жидкие частицы, линия потока, стационарный поток и уравнений неразрывности [4]. Так например, в корреляционном расходомере проектируемом для измерения скоростного потока нужно учитывать уравнение неразрывности полученное дифференцированием закона сохранения массы:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0, \quad (2)$$

где u, v и w – компоненты скорости для направлений x, y и z соответственно. Для случая несжимаемой жидкости, выражение (2) упрощается:

$$\frac{\partial(u)}{\partial x} + \frac{\partial(v)}{\partial y} + \frac{\partial(w)}{\partial z} = 0. \quad (3)$$

Таким образом, оптоволоконные системы контроля физических параметров многофазных флюидов в процессе бурения скважин имеют два важных фактора исследования. Во первых сами системы обладающие оптимальными свойствами использования в «агрессивной» среде скважины, во вторых проектирование таких систем позволяет учесть внешние условия для чувствительных элементов системы (выражение 1) и классические основы физических процессов сред (выражения 2-3). А возможность оптоволоконной системы использование нескольких сигналов в одном оптоволокне позволит учесть влияние магнитных и электрических полей, также основанных на магнитооптическом эффекте Фарадея [5]. Это улучшит искро-, взрывобезопасность измерительной аппаратуры.

Библиографический список

1. Ипатов А.И., Кременецкий М.И., Каешков И.С., Буянов А.В. Стационарный мониторинг геофизических параметров при

контроле разработки месторождений. Возможности, проблемы и перспективы использования // Актуальные проблемы нефти и газа. – 2018. – № 2(21). – С. 12–18.

2. Ураксеев М.А. Применение магнитооптического элемента Фарадея в информационно-измерительных системах контроля магнитного поля и электрического тока / М.А. Ураксеев, Т.М. Левина // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2008. – № 2 (2). – С. 24-31.

3. Фаррахов Р.Г. Оптико-электронные преобразователи температуры для систем контроля технологическими процессами [Текст] / А.А. Мухамадиев, Р.Г. Фаррахов, М.А. Ураксеев. – Уфа: Уфимск. гос. акад. эконо. и сервиса, 2010. – 107 с.

4. Джексон Р.Г. Новейшие датчики / пер. с англ. под ред. В.В. Лучинина. – Изд. 2-е, доп. – М.: Техносфера, 2008. – 397 с.

5. Ураксеев М.А., Левина Т.М. Математическое моделирование оптоволоконных приборов и систем на магнитооптическом эффекте фарадея // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2014. Т. 20. № 6 (133).

Сведения об авторах

Левина Татьяна Михайловна, кандидат технических наук, доцент
Филиала ФГБОУ ВО УГНТУ в г. Салавате. E-mail: tattin76@mail.ru.

УДК 536.46:538.911: 621.315.592

Нигматуллина Г.Р., Биккулова Н.Н.

РЕНТГЕНОФАЗОВЫЙ АНАЛИЗ СЕЛЕНИДА МЕДИ ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СИНТЕЗА

В работе представлены результаты рентгенофазового анализа нестехиометрического соединения селенида меди $Cu_{2-x}Se$ полученного методом СВС. Установлен фазовый состав продукта горения и определены параметры элементарной ячейки α и β модификаций $Cu_{2-x}Se$.

Ключевые слова: селенид меди, самораспространяющийся высокотемпературный синтез, рентгенофазовый анализ.

Nigmatullina G.R., Bickulova N.N.

X-RAY PHASE ANALYSIS OF COPPER SELENIDE OBTAINED BY SELF-PROPAGATING HIGH-TEMPERATURE SYNTHESIS

The paper presents the results of X-ray phase analysis of the non-stoichiometric copper selenide compound Cu_{2-x}Se obtained by the SHS method. The phase composition of the combustion product was established and the unit cell parameters a and b of the Cu_{2-x}Se modifications were determined.

Keywords: copper selenide, self-propagating high-temperature synthesis, X-ray phase analysis.

Селенид меди Cu_{2-x}Se характеризуется высоким значением термоэлектрической добротности $ZT \sim 1.4\text{--}2.1$ при 700°C [1], что является следствием его аномально низкой теплопроводности $0.4\text{--}0.6 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$.

Высокая добротность в сочетании с хорошими механическими свойствами [2] и относительно высокой температурой плавления (1130°C) делают Cu_{2-x}Se перспективным среднетемпературным (диапазон $300\text{--}700^\circ\text{C}$) термоэлектрическим материалом для применения в солнечных элементах, оптических фильтрах, нанопереклutchателях, термоэлектрических и фотоэлектрических преобразователях [1–3].

Соединение Cu_{2-x}Se активно изучается более восьмидесяти лет. Несмотря на простоту состава, до сих пор возникают расхождения в данных о кристаллической структуре и типе фазового перехода в данной системе.

Для синтеза Cu_{2-x}Se применяют различные технологические приемы, в основе которых лежат физические или химические процессы. Большинство методов синтеза обладает общими недостатками, связанными с использованием достаточно сложного технологического оборудования, создания высоких температур и вакуума, при этом не всегда обеспечивается получение необходимых функциональных свойств.

Для решения данной проблемы нами был предложен синтез халькогенидов меди методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС).

СВС-процесс характеризуется высокой температурой (до 4000°C) и большой скоростью распространения фронта горения ($0.1\text{--}100 \text{ см}/\text{с}$). Большие скорости горения обеспечивают высокую производительность процесса, что делает СВС актуальным для широкого использования в технологии получения неорганических материалов [4].

В качестве исходных компонентов для синтеза использовали порошок меди марки ПМС-1 ГОСТ 4960-2009 и селен гранулированный особо чистый ТУ 6-09-2521-77. Гранулы селена измельчали в агатовой ступке до фракции менее 63 мкм. Состав смесей задавался из отношения компонентов реакции:



в расчете на получение Cu_{2-x}Se в области гомогенности с $x=0$; 0.15 и 0.3.

Для измерения температуры и скорости горения использовали две хромель-алюмелевые термопары, спаи которых располагали в отверстиях на боковой поверхности образца на расстоянии 15 мм. Образцы поджигали с верхнего торца вольфрамовой спиралью. Горение проводили в среде аргона при давлении $P = 0.5 \text{ МПа}$. Сгоревшие образцы размалывали вручную в агатовой ступке.

Часть синтезированного порошка подвергали изотермическому отжигу. Образцы для отжига готовили прессованием в виде таблеток массой 2.5 г, диаметром 10 мм и высотой 8 мм. Изотермический отжиг одновременно трех образцов различной стехиометрии проводили в течение 7 и 48 часов при температуре 400°C в контейнере из тантала в среде аргона при давлении 0.3 МПа.

Рентгенофазовый анализ порошков, полученных при горении, показал наличие нескольких фаз (рис.1).

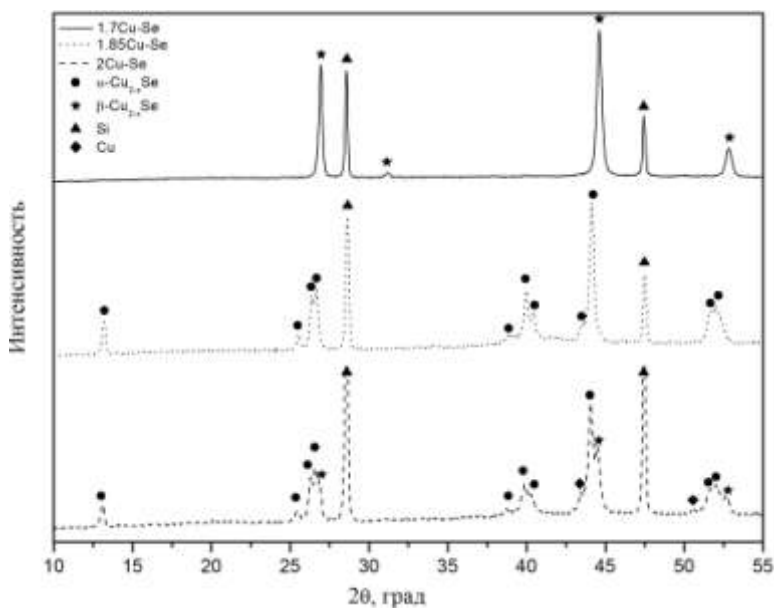


Рис. 1. Дифрактограммы продукта горения смесей $(2-x)\text{Cu}+\text{Se}$

В результате горения смеси со стехиометрическим отношением компонентов $2\text{Cu}-\text{Se}$ образуется фаза Cu_{2-x}Se , которая присутствует в составе вещества в двух модификациях – моноклинной и кубической. Кроме того, продукт содержит до 2 масс.% Cu (табл.№1), что свидетельствует о частичном испарении Se, парциальное давление которого при температуре 807 K в волне горения составляет 13,33 кПа. Горение смесей нестехиометрических составов приводит к образованию однофазного материала – моноклинной модификации Cu_{2-x}Se в случае $1.85\text{Cu}+\text{Se}$ и кубической модификации Cu_{2-x}Se для $1.7\text{Cu}+\text{Se}$. Наблюдаемая тенденция изменения фазового состава отражает изменение концентрационных границ полиморфного превращения, ограничивающих двухфазную область существования α - и β - Cu_{2-x}Se при увеличении содержания Se в пределах 33.8-36.1 ат.% Se (рис.1). В таблице № 2 приведены параметры элементарной ячейки α и β модификаций Cu_{2-x}Se в области гомогенности.

Таблица № 1. Фазовый состав материала после синтеза
и изотермического отжига, масс.%

Состав смеси	Время, ч	Содержание, мас.%		
		α -Cu _{2-x} Se C 2/c (15)	β -Cu _{2-x} Se Fm-3m (225)	Cu Fm-3m (225)
2Cu+Se	0	70	28	2
	7	100	0	0
	48	100	0	0
1.85Cu+Se	0	100	0	0
	7	84	16	0
	48	65	35	0
1.7Cu+Se	0	0	100	0
	7	0	100	0
	48	16	84	0

Таблица № 2. Параметры элементарной ячейки моноклинной * (α)
и кубической (β) фазы Cu_{2-x}Se, Å

Состав смеси	Время, ч	Параметры элементарной ячейки, Å	
		α -Cu _{2-x} Se C 2/c (15)	β -Cu _{2-x} Se Fm-3m (225)
2Cu+Se	0	1192.8(4)	5.7623(6)
	7	1192.9(3)	нет
	48	1191.6(5)	нет
1.85Cu+Se	0	1191.2(9)	нет
	7	1191.7(8)	5.767(1)
	48	1191.0(7)	5.769(2)
1.7Cu+Se	0	нет	5.7578(4)
	7	нет	5.7569(9)
	48	1193.7(2)	5.7662(5)

* Для моноклинной α - фазы приведен объем элементарной ячейки, Å³.

Изотермический отжиг при 673К и длительностью более 7 часов порошка, синтезированного при горении стехиометрической смеси 2Cu+Se, состав которого отвечает двухфазной области диаграммы состояний, приводит к получению однофазного материала – моно-

клинной фазы α -Cu_{2-x}Se. Кубическая фаза β -Cu_{2-x}Se, образовавшаяся при горении смеси 1.7Cu+Se является неустойчивой и при отжиге в течение 48 часов при 673K наблюдается образование моноклинной фазы α -Cu_{2-x}Se. Предполагается, что выделение α -Cu_{2-x}Se при длительном отжиге связано с испарением Se за счет перехода сплава при нагреве выше 656K в двухфазную область β -Cu_{2-x}Se(тв)+Se(ж).

Библиографический список

1. Yang, L., Chen, Z.-G., Han, G., Hong, M., Zou, Y., and Zou, J., High-performance thermoelectric Cu₂Se nanoplates through nanostructure engineering, *Nano Energy*, 2015, vol. 16, pp. 367–374. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2015.07.012>.
2. Tyagi, K., Gahtori, B., Bathula, S., Jayasimhadri, M., Sharma, S., Singh, N. K., Haranath, D., Srivastava, A. K., and Dhar, A., Crystal structure and mechanical properties of spark plasma sintered Cu₂Se: An efficient photovoltaic and thermoelectric material, *Solid State Communications*, 2015, vol. 207, pp. 21–25. <https://doi.org/10.1016/j.ssc.2015.02.004>.
3. Xue, L., Zhang, Z., Shen, W., Ma, H., Zhang, Y., Fang, C., and Jia, X., Thermoelectric performance of Cu₂Se bulk materials by high-temperature and high-pressure synthesis, *Journal of Materiomics*, 2018, vol. 5, i. 1, pp. 102–110. <https://doi.org/10.1016/j.jmat.2018.12.002>.
4. Левашов, Е.А. Перспективные материалы и технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза / Е.А. Левашов, А.С. Рогачев, В.В. Курбаткина, Ю.М. Максимов, В.И. Юхвид. – Москва: МИСиС 2011. – 377 с.

Сведения об авторах

Нигматуллина Гульназ Рамазановна, младший научный сотрудник ИСМАН (Черноголовка). E-mail: enigma@ism.ac.ru.

Биккулова Нурия Нагимьяновна, доктор физико-математических наук, профессор СФ БашГУ (Стерлитамак). E-mail: bickulova@mail.ru.

Низамова А.Д., Валиев А.А.

К ЧИСЛЕННОМУ МЕТОДУ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЫТЕСНЕНИЯ НЕФТИ ВОДОЙ В ПЛОСКОМ КАНАЛЕ

В статье рассматривается плоский канал, заполненный несжимаемой жидкостью. С течением времени в канал нагнетается другая жидкость. Жидкости являются не смешивающимися. В работе изучается численный метод, основанный на ранее полученной математической модели процесса вытеснения нефти водой.

Ключевые слова: вытеснение, несмешивающиеся жидкости, неустойчивость, плоский канал, заводненность пласта.

Nizamova A.D., Valiev A.A.

ON A NUMERICAL METHOD FOR RESEARCH OIL DISPLACEMENT BY WATER IN A PLANE CHANNEL

The article deals with a plane channel filled with an incompressible fluid. Over time, another fluid is injected into the channel. The fluids are immiscible. The paper studies a numerical method based on a previously obtained mathematical model of the process of oil displacement by water.

Keywords: displacement, immiscible fluids, instability, plane channel, water flooding.

Одной из актуальных задач нефтегазовой промышленности является задача неустойчивого вытеснения, которая возникает при явлении вытеснения флюида с наибольшим по значению коэффициентом термовязкости. Как пример данного явления служит вытеснение нефти в пласте, водой и различными агентами, вязкость которых значительно меньше вязкости нефти, приводящее к постепенной заводнённости пласта.

Основы современного состояния исследования в теории фильтрации несмешивающихся жидкостей были заложены еще в работах Лейбензона Л.С. В этих работах были впервые решены плоскопараллельная и плоскорадиальная задачи поршневого вытеснения вязкой жидкости из пористой среды.

Моделью вытеснения несмешивающихся жидкостей является модель Бакли–Лeverетта, которая в настоящее время наиболее часто

используема в теории фильтрации двухфазных жидкостей. Математическая модель данного процесса состоит из обобщенного закона Дарси и законов сохранения масс обеих несмешивающихся фаз. Первый из этих законов подразумевает зависимость фазовых проницаемостей от объемных долей каждой из несмешивающихся жидкостей в поровом пространстве. Получаемая в результате система уравнений решается с учетом начальных и граничных условий, налагаемых на функции распределения насыщенностей и давлений в фазах. Допущение, принимаемое в модели Бакли-Леверетта, об отсутствии капиллярного скачка давления на границе подвижных фаз позволяет упростить исходную систему уравнений. Однако, такое упрощение приводит к необходимости введения фронта разрыва насыщенности, впервые описанного Бакли и Левереттом.

Модель Рапопорта-Лиса является более полной моделью несмешивающейся фильтрации. Математическая модель Рапопорта-Лиса содержит дополнительное уравнение, которое определяет скачок давления на границе фаз. Учет влияния капиллярных сил позволяет описать так называемую стабилизированную зону, возникающую вблизи границы раздела фаз. Протяженность этой зоны обратно пропорциональна скорости вытеснения. Такой подход справедлив для малых скоростей вытеснения. В рамках модели Рапопорта-Лиса был получен ряд важнейших результатов, касающихся изменения нефтенасыщенности коллекторов в процессе их обводнения.

При описании двухфазной фильтрации в реальных средах также важным является вопрос устойчивости фронта вытеснения к малым возмущениям. Экспериментальные исследования, проведенные Саффманом и Тейлором и другими, показали, что развитие возмущений плоского фронта вытеснения в пористой среде при нарушении устойчивости происходит в виде неограниченно разрастающихся языков вытесняющей жидкости. Эксперименты на насыпных пористых средах, показали, что нарушение устойчивости происходит при отношении вязкости взаимодействующих жидкостей, превышающем критическое значение 10-15. В то же время, при малых скоростях вытеснения, возмущения затухают даже при отношениях вязкостей, больших критического. Математическая модель развития языков вытесняющей жидкости бала предложена Баренблаттом. Предполагается, что этот процесс может быть описан при помощи уравнений модели Бакли-Леверетта, с относительными фазовыми проницаемостями, линейно зависящими от соответствующих насыщенностей.

Современному исследованию неустойчивого вытеснения несмешивающихся жидкостей в плоском канале посвящены работы [4-5]. Процесс развития вытеснения, изученный экспериментально, подробно описан в работе [2].

В настоящей работе изучается численный метод, основанный на ранее полученной математической модели процесса вытеснения нефти водой.

Рассмотрим плоский канал, заполненный несжимаемой жидкостью. С течением времени в канал нагнетается другая жидкость. Жидкости являются не смешивающимися. Канал имеет прямоугольную форму размерами: ширина $b = 20$ мм; длина $l = 35$ мм; толщина $h = 0,02$ мм; и отверстиями входа и выхода жидкости диаметрами $d = 1$ мм, расположенными на центральной линии канала. Ось абсцисс разместим также на центральной линии канала, а ось ординат – на левой границе канала. Направление течения – горизонтальное. В процессе вытеснения образуется зона совместного движения двух жидкостей.

Для решения задачи применяется квазигидродинамический подход, основанный на добавке малого параметра, позволяющий написать устойчивые схемы с центральными разностями.

Математическая модель для изотермического односкоростного, двухфазного течения с несмешивающимися жидкостями состоит из уравнений Навье-Стокса, уравнения сохранения массы, импульса и энергии [1,3].

Полученные в дальнейшем исследовании численные результаты будут сравниваться с экспериментальными для дальнейшего анализа и выявления оптимальных условий для повышения эффективности нефтеотдачи.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 20-31-80008-мол_эв_а).

Библиографический список

1. Валиев А.А., Низамова А.Д. Комплексное исследование вытеснения нефти водой в плоском канале // Многофазные системы. 2020. Т. 15. №1-2. С. 25.
2. Мавлетов М.В., Валиев А.А. Эффективность неустойчивого вытеснения нефти из ячейки Хеле-Шоу // Нефтепромысловое дело. 2018. № 8. С. 42-45.

3. Низамова А.Д., Валиев А.А. Математическая модель вытеснения нефти водой в плоском канале // Многофазные системы. 2020. Т.15. №3-4. С. 208-211.

4. Homsy G. M. Viscous fingering in porous media // Annual review of fluid mechanics. 1987. Vol. 19. № 1. Pp. 271-311.

5. Saffman P.G., Taylor G. The penetration of a fluid into a porous medium or Hele-Shaw cell containing a more viscous liquid // Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. The Royal Society. 1958. Vol. 245. № 1242. Pp. 312-329.

Сведения об авторах

Низамова Аделина Димовна, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Института механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН (Уфа). E-mail: adeshka@yandex.ru.

Валиев Азат Ахматович, магистрант, инженер-исследователь Института механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН (Уфа). E-mail: azatphysic@mail.ru.

УДК 543.579

Рахматуллина А.С., Казакова Е.В.

МЕТОДЫ ТЕРМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ПОЛИМЕРОВ

В статье рассматриваются методы термического анализа полимеров и их применение.

Ключевые слова: полимер, метод, динамический, растяжение, температура, время, термопластичный, термореактивный.

Rakhmatullina A.S., Kazakova E.V.

THERMAL ANALYSIS METHODS

The article discusses the methods of thermal analysis of polymers and their application

Keywords: polymer, method, dynamic, stretching, temperature, time, thermoplastic, thermosetting.

С середины 20-го века производство полимерных материалов превратилось в одну из основных мировых индустрий, которая влияет на все сферы жизни человека. Полимеры позволили усовершенствовать

производство значительной части выпускаемой продукции – конструкционных и строительных материалов, тканей и т.д. Полимерные вещества внедрились во все сферы человеческой деятельности – технику, здравоохранение, быт. Ежедневно мы сталкиваемся с различными пластмассами, резинами, синтетическими волокнами. При этом различные полимеры отличаются друг от друга по многим параметрам.

Поскольку физические переходы в структуре полимера под действием температуры сопровождаются тепловыми эффектами, а при прохождении химических реакций и некоторых физических процессов изменением массы образцов, это позволяет применять для исследования ряда свойств полимеров термический анализ [1].

В термическом анализе, изучающем изменение свойств материалов под воздействием температуры, выделяют несколько методов, из которых для исследования термической стабильности полимера используются следующие: динамический механический анализ (ДМА), термический механический анализ (ТМА), термогравиметрический анализ (ТГА), дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК) [1].

Динамический механический анализ (ДМА) – один из важных методов, который применяется для изучения зависимости механических и вязкоупругих свойств материалов от температуры, времени и частоты при воздействии периодических нагрузок. Метод позволяет анализировать термопластичные и терморезактивные полимеры, композитные материалы, эластомеры, керамику, металлы и другие материалы.

В ДМА образец подвергается периодической деформации в одном из нескольких режимов (изгиб, растяжение, сдвиг и сжатие). В рамках анализа измеряется модуль Юнга в зависимости от времени или температуры и регистрируется информация о фазовых переходах [1].

Технология ДМА – идеальное решение в случаях, когда требуется с максимальной точностью определить свойства материала в широком диапазоне жесткости и (или) частоты колебаний. Кроме того, метод ДМА чрезвычайно универсален. Он позволяет исследовать материалы в условиях контролируемой влажности или даже при погружении их в жидкость [2].

Термомеханический метод основан на определении величины деформации в зависимости от температуры, при этом характер прилагаемой нагрузки может быть различным: нагрузка может быть постоянно действующая или периодически прилагаемая на определенный

промежуток времени, при этом фиксируется деформация полимерного тела при каждой температуре и выбранном времени действия силы.

Для проведения термомеханического анализа используют различные методы деформации, временной режим механического воздействия, устройства аппаратуры и способы регистрации. Рассмотрим основные способы деформирования полимера [1].

Метод одноосного растяжения. В этом методе один конец образца полимера неподвижно закрепляют, а к другому прилагают растягивающее постоянное усилие. В результате под действием возникающего напряжения образец будет удлиняться в направлении приложения силы.

Этот метод неудобен для измерений при больших деформациях, такие деформации свойственны многим полимерам в этом режиме и выявляют их природу. Для высокоэластических полимеров характерны деформации порядка сотен процентов, а при переходе к вязкому течению полимер имеет тенденцию вообще к беспредельному растяжению до разрыва. Поэтому метод растяжения позволяет исследовать только самое начало температурной области размягчения полимера. Растяжению подвергаются образцы, приготовленные в виде нитей или лент постоянного сечения, иногда используют образцы в виде двусторонних лопаточек.

Однако при действии постоянного усилия удельная нагрузка по мере сжатия убывает вследствие возрастания площади сечения образца. Метод сжатия полезен для исследования относительно малых деформаций, но не позволяет полностью провести термомеханический анализ, в особенности при постоянном действии груза, когда происходит непрерывное накопление деформаций.

Деформация при пенетрации – это модифицированный метод одноосного сжатия. В этом методе подвижный рабочий орган (пуансон) выполнен в виде стержня с копчиком заведомо меньшего сечения, чем торцовая поверхность образца. Таким образом, на протяжении всего эксперимента удельное давление, рассчитываемое на действующую поверхность, предполагается постоянным. В ходе исследования происходит пенетрация, т.е. постепенное внедрение нагруженного пуансона в массу исследуемого образца, вплоть до достижения его основания. Этот метод воздействия на полимер оказался наиболее применимым в ТМА [1].

При проведении ТМА используют различные приборы и аппаратуру. Основным назначением аппаратного обеспечения ТМА явля-

ется осуществление и измерение деформации полимеров в ходе изменения их температуры. При всем многообразии приборов, разработанных для этой цели, все они содержат определенные функциональные элементы, соответствующие основным принципам методики.

Для проведения термического анализа применяются пирометрические установки (термовесы), позволяющие непрерывно определять массу образца в зависимости от температуры.

Все термические установки состоят в основном из печи или нагревательного устройства, тигля, измерителей температуры печи, регулятора, обеспечивающего нагрев по заданной программе, регистратора термических кривых (самописца) [2].

Принцип работы таких приборов основан на непрерывной регистрации зависимости изменения массы образца от времени или температуры при его нагревании в соответствии с выбранной температурной программой в заданной газовой атмосфере. Одновременно регистрируется выделение или поглощение тепла образцом, обусловленное фазовыми переходами или химическими реакциями.

Процесс термогравиметрического анализа (ТГА) состоит из двух этапов: 1) техническое выполнение анализа и запись термограммы; 2) расшифровка термограммы [2].

При анализе термограмму исследуемого вещества сравнивают с термограммами «стандартов» – чистых минералов (солей) и по характерным термическим эффектам определяют присутствие их в исследуемом материале. Термограммы «стандартов» приводятся в соответствующих справочниках. Можно пользоваться также справочными таблицами, в которых для различных минералов указаны характерные термические эффекты, соответствующие им температурные интервалы, а также изменение веса [2].

Дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК) – это метод, используемый для характеристики стабильности белка или другой биомолекулы непосредственно в ее нативной форме. Процедура выполняется посредством измерения теплообмена, связанного с термическим денатурированием молекулы при нагревании с постоянной скоростью [1].

Таким образом, к числу наиболее важных процессов и характеристик, которые можно изучать методом ДСК, относятся стеклование, плавление, энтальпия реакций и влияние наполнителей.

Основная область применения ТГА – анализ химического состава, термической стабильности и склонности к выделению летучих

продуктов. ТМА обычно используется для изучения термического расширения и усадки материалов. ДМА – оптимальный метод для изучения вязкоупругих свойств материалов [2].

Библиографический список

1. Эшворт М.Р.Ф. Термические методы анализа органических соединений. – М.: Химия, 1968. – 555 с.
2. Дифференциально-термический и термогравиметрический анализ термодеструкции полимерных материалов <https://cyberleninka.ru/article/n/differentsialno-termicheskiy-i-termogravimetricheskiy-analiz-termodestruksii-polimernyh-materialov>.

Сведения об авторах

Рахматуллина Аделя Спартаковна, студент СФ БашГУ (Стерлитамак). E-mail: adelya.rakhmatullina.99@mail.ru.

Казакова Елена Владимировна, старший преподаватель СФ БашГУ (Стерлитамак). E-mail: kazakova_yelena@mail.ru.

УДК 691.175.664

Рахматуллина А.С., Казакова Е.В.

ПОЛУЧЕНИЕ ПОЛИУРЕТАНА. СПОСОБЫ ЕГО МОДИФИКАЦИИ

В статье рассматривается получение полиуретана и способы его модификации.

Ключевые слова: полиуретан, изоцианаты, полиолы, структура, модификация, эластомеры, сырье, технология, синтез.

Rakhmatullina A.S., Kazakova E.V.

OBTAINING POLYURETHANE. WAYS TO MODIFY IT

The article discusses the production of polyurethane and methods of it's modification.

Keywords: polyurethane, isocyanates, polyols, structure, modification, elastomers, raw materials, technology, synthesis.

Полиуретаны (ПУ) синтетические гетероцепные полимеры. Полиуретаны могут сильно отличаться друг от друга строением цепи,

химической природой и свойствами, но их объединяет наличие в основной цепи макромолекулы уретановых групп -NHCOO- .

Количество уретановых групп зависит от молекулярной массы конкретного полиуретана и соотношения исходных компонентов при его синтезе. В зависимости от природы последних в макромолекулах полиуретанов могут содержаться и другие функциональные группы: простые эфирные и сложноэфирные (полиэфируретаны), мочевиновые (полиуретанмочевины), изоциануратные (полиуретанизоцианураты), амидные (полиамидоуретаны), двойные связи (полидиенуретаны), которые наряду с уретановой группой определяют комплекс свойств полимеров. При увеличении числа функциональных групп в молекулах одного или обоих компонентов до трех или более получают разветвленные или сшитые полимеры.

Структуру и свойства полиуретанов можно менять в широких пределах путем подбора соответствующих исходных веществ. Они относятся к числу тех немногих полимеров, у которых можно направленно регулировать число поперечных связей, гибкость полимерных молекул и характер межмолекулярных взаимодействий. Это дает возможность получать из полиуретанов самые разнообразные материалы синтетические волокна, твердые и мягкие эластомеры, жесткие и эластичные пеноматериалы, различные термореактивные покрытия и пластические массы [1].

Полиуретан получают в результате химической реакции двух основных компонентов, известных как полиолы и изоцианаты. Часто используется термин диизоцианаты. Это составы, содержащие двойные группы изоцианата. Полиолы и изоцианаты вступают в реакцию в присутствии соответствующих катализаторов и добавок, в результате чего образуются различные типы и сорта полиуретана. Добавки обычно используются для защиты физической целостности материала, окрашивания и повышения огнестойкости [2].

Сырье содержится в индивидуальных резервуарах из нержавеющей стали, где оно перемешивается для предотвращения отверждения, а теплообменниками поддерживается температура компонентов на уровне, необходимом для осуществления реакции. Каждый резервуар оборудован дозирующим устройством для подачи с помощью насосов определенного количества материалов, участвующих в реакции, и поддержания в смеси заданного соотношения компонентов. Типовое соотношение полиола к изоцианату 1:2. Хотя для получения полиуретанов используют различные методы, наиболее удобным является

форполимерный. На первой стадии проводят реакцию диола с избытком диизоцианата. Получаемый продукт реакции называется форполимером. Он имеет невысокий молекулярный вес и представляет собой или жидкость, или низкоплавкое твердое вещество. Поскольку он содержит концевые изоцианатные группы, то может вступать во все реакции, свойственные изоцианатам.

На второй стадии к форполимеру добавляют низкомолекулярный гликоль или диамин. Соотношение реагентов подбирают так, чтобы в смеси имелся небольшой избыток изоцианатных групп.

Последняя стадия процесса (отверждение) может начаться в то время, когда вторая еще не закончилась и может продолжаться в течение нескольких часов или даже суток в зависимости от выбранной системы и температуры. На этой стадии происходит взаимодействие концевых изоцианатных групп с активными атомами водорода цепи [1].

Реагенты могут подаваться через теплообменники для поддержания необходимой температуры реакции. Главные компоненты подаются в смеситель или смесительную головку, где они вступают в реакцию с образованием полиуретана. К тому времени, когда жидкая смесь подана в пресс-форму, полиуретан уже химически сформирован. Реакция полимеризации между спиртом и изоцианатом экзотермическая, в процессе выделяется примерно 24 ккал/моль тепловой энергии. Средняя реакционная способность изоцианата по отношению к спиртам требует применения таких катализаторов, как щелочи, третичные амины, металлоорганические соединения и некоторые другие. Реакционная способность сильно зависит от структуры реагентов. Так, присутствие вторичных и третичных гидроксильных групп, близко расположенных к метильным группам, снижает скорость реакции из-за возникновения стерического эффекта. Основность аминов имеет сильный каталитический эффект на реакции изоцианатов [2].

Для модификации сегментированного полиуретана применяются следующие способы [2]:

1. Использование более сложных составов, таких как 1,5-нафтилендиизоцианат и толуилеидиизоцианат. Эти более дорогие материалы используются для получения более твердых полиуретанов с более высокой температурой плавления.

2. Использование катализаторов реакций: третичные амины, хелатные соединения Fe, Си, Be, V, нафтенаты Pb и Sn, октаоат (октоат) и лауринат Sn.

3. Стабилизаторы. В присутствии кислорода метиленовые группы, соседние с С-О-группами, быстро окисляются до пероксидных. Температуры выше 160°C могут привести к внутреннему окислению в сформированном вспененном блоке с изменением цвета на желтый и коричневый (подгоранию). Более того, при температурах выше 170°C может произойти спонтанное самовоспламенение. Поэтому необходимы эффективные антиоксиданты для предотвращения неконтролируемой окислительной деструкции.

4. Антиокислители (Первичные и вторичные антиоксиданты). Первичные антиоксиданты также называются донорами протона и поглотителями свободных радикалов. К этому классу относятся замещенные фенолы, вторичные ароматические амины и производные бензофурана. Соединения этого типа представляют собой массивную, малоподвижную молекулу с подвижным, легко отщепляющимся атомом водорода, который реагирует со свободным радикалом. Активность образующегося после отщепления водорода радикала существенно ниже пассивности алкильного радикала полимера.

Фенольные антиоксиданты обладают рядом неоспоримых преимуществ – высокоэффективны, не летучи, разрешены к применению в прямом контакте с пищевыми и косметическими продуктами. Кроме того, в соответствии с европейским и американским законодательством разрешено использовать природный антиоксидант витамин Е (α-токоферол).

Эффективность первичных антиоксидантов значительно повышается в присутствии фосфитов и тиоэфиров (вторичные антиоксиданты), с которыми они образуют синергические смеси.

Фосфиты и фосфониты считаются наиболее эффективными в группе вторичных антиоксидантов. Они прекрасно подходят для защиты полимеров и первичных антиоксидантов в процессе переработки в изделия.

Полиуретановые материалы нейтральны по отношению к различным тканям и жидкостям человеческого организма. При этом изделия из них обладают малым удельным весом и высокой прочностью, и их сравнительно легко стерилизовать (невспененные материалы). Вспененные ПУ-материалы характеризуются высокой несущей способностью и непревзойденными комфортными свойствами. Это делает полиуретаны незаменимыми среди материалов медико-биологического назначения [1]: эндопротезы, имплантаты, экзопротезы (стопы, кисти и пр.), аллопластика; искусственные челюсти; кате-

теры и трубки общего назначения; элементы раневых повязок; шовный материал; пластиковый гипс (полиуретановый бинт); полиуретановые гидрогели; ортопедическая обувь, стельки, вкладки, накладки и разделители для стоп; детали инвалидных колясок и изделий для ухода за больными; аппликаторы медицинского назначения из вспененного открытопористого полиуретана.

Библиографический список

1. Саундерс Дж.Х., Фриш К.К. Химия полиуретанов. М.: Химия, 1968. – 470 с.
2. <https://polimertechprom.com/poliuretan-primenenie-i-svoystva/>

Сведения об авторах

Рахматуллина Аделя Спартаковна, студент СФ БашГУ (Стерлитамак). E-mail: adelya.rakhmatullina.99@mail.ru.

Казакова Елена Владимировна, старший преподаватель СФ БашГУ (Стерлитамак). E-mail: kazakova_yelena@mail.ru.

УДК 538.913

**Сафаргалиев Д.И., Биккулова Н.Н., Якшибаев Р.А.,
Акманова Г.Р., Курбангулов А.Р.**

ЗОННАЯ СТРУКТУРА КВАНТОВЫХ ТОЧЕК НА ОСНОВЕ СЕЛЕНИДА МЕДИ

В работе приведены расчеты зонной структуры квантовых точек на основе селенида меди.

Ключевые слова: суперионные проводники, фазовая диаграмма, зонная структура, квантовые точки.

**Safargaliev D.I., Bikkulova N.N., Yakshibaev R.A., Akmanova G.R.,
Kurbangulov A.R.**

ZONE STRUCTURE OF QUANTUM DOTS BASED ON COPPER SELENIDE

The paper presents calculations of the band structure of quantum dots based on copper selenide.

Key words: superionic conductors, phase diagram, cell parameters, quantum dots.

Квантовые точки являются сравнительно новым и весьма интересным объектом исследования в физике твердого тела. Трехмерное ограничение движения носителей заряда (электронов и дырок) приводит к полностью дискретному спектру их состояний. В результате этого ограничения движения многие физические свойства квантовых точек значительно отличаются от свойств объемных кристаллов, а также объектов с ограничением движения носителей в одном или двух направлениях (квантовые ямы и квантовые нити). Популярным является сравнение квантовых точек с атомами, а заряженных квантовых точек с ионами. При этом имеются в виду такие общие свойства этих систем как трехмерная локализация носителей и дискретность спектра энергетических состояний.

Квантовые точки применяются в гибридных солнечных батареях в качестве материала, преобразующего солнечную энергию в постоянный электрический ток. Использование квантовых точек в многослойных солнечных батареях позволяет добиться более эффективного поглощения солнечного излучения, так как они могут поглощать свет в более широком диапазоне (включая инфракрасный и ультрафиолетовый), чем традиционные солнечные элементы.

Данная статья посвящена расчету зонной структуры селенида меди в наносостоянии. В качестве объекта исследования выбран смешанный суперионный проводник меди, обладающий кубической графцентрированной решеткой в суперионном состоянии. Проведены модельные расчеты зонной структуры наноточек селенида меди в зависимости от расстояния между квантовыми точками.

Модельные компьютерные расчеты проведены с помощью программы Quantum Espresso [1]. При расчете были использованы ультрамягкие псевдопотенциалы для меди, для халькогенов – псевдопотенциалы сохраняющие норму, которые сгенерированы данной программой. Энергия обрезки плоских волн имела величину 85- 100 Ry. При расчетах учитываются d-, s-электроны для катионов и s-, p-электроны для анионов. Использовался автоматический выбор точек обратной решетки (k-точек) при помощи метода Монкхорста–Пака на сетке 8x8x8.

При высоких температурах Cu_2Se имеет ГЦК структуру [2] (рис.1).

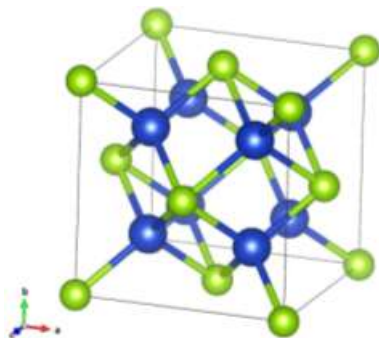


Рис. 1. Структура ГЦК соединения Cu_2Se в суперионном состоянии

На рис.2 представлена зонная структура и плотность электронных состояний для объемного селенида меди.

Зонная структура и плотность электронных состояний для наноточки Cu_2Se ($20\text{\AA}$) представлена на рис.3.

Результаты исследования свидетельствуют о том, что электронная структура селенида меди характеризуется гибридизацией р-уровней селена и d-уровней меди. Анализ полученной парциальной и полной плотности электронных состояний показывает, что рd-гибридизация сильнее проявляется в теллуридах серебра, чем в селенидах меди.

Расчет зонной структуры показал, что соединение селенида меди является бесщелевым полупроводником.

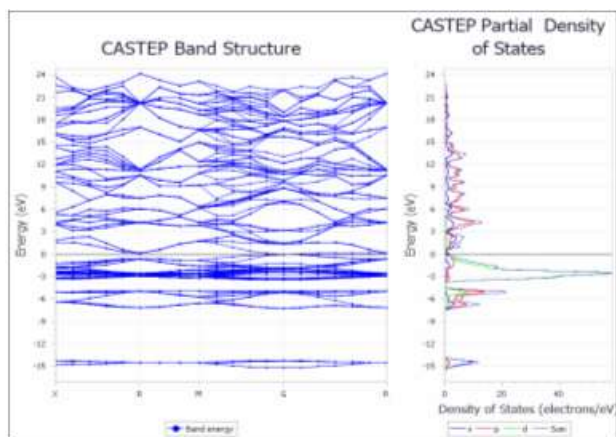


Рис. 2. Зонная структура и плотность электронных состояний для соединения Cu_2Se (кубическая структура)

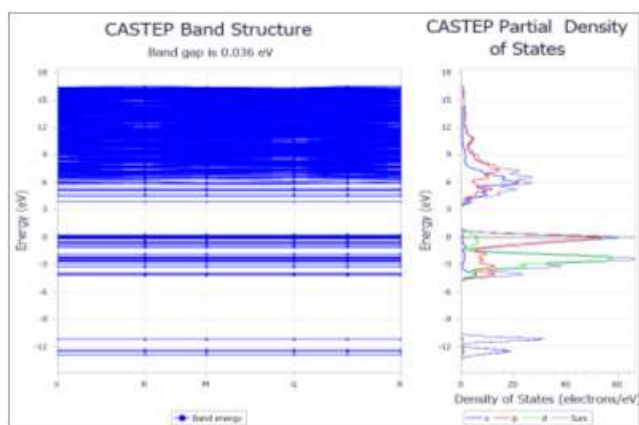


Рис. 3. Зонная структура и плотность электронных состояний для наноточки Cu_2Se (20 Å)

Зонные структуры смоделированных наноточек селенида меди являются полностью дискретными, вид зонной структуры и ширина запрещенной зоны зависят от состава соединений и размера частиц.

Работа подготовлена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-32-90216.

Библиографический список

1. Quantum-ESPRESSO [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.quantum-espresso.org>
2. Горбачев В.В. Полупроводниковые соединения A2IBIV // М.: Металлургия, 1980. 132 с.

Сведения об авторах

Сафаргалиев Данир Ильдарович, аспирант кафедры общей физики физико-технического института БашГУ. E-mail: danirsafargaliev@gmail.com.

Биккулова Нурия Нагимовна, доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой общей и теоретической физики Стерлитамакского филиала БашГУ. E-mail: bickulova@mail.ru.

Якшибаев Роберт Асгатович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры общей физики физико-технического института БашГУ, E-mail: yakshibaev5252@mail.ru.

Акманова Гузель Рифкатовна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей физики физико-технического института БашГУ. E-mail: grakmanova@mail.ru.

Курбангулов Азат Рифкатович, старший преподаватель кафедры общей и теоретической физики Стерлитамакского филиала БашГУ, E-mail: azatkurbanstr@mail.ru.

УДК 536.255: 53.06

Филиппов А.И.

ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ ГОРЕНИЯ

На основе решения нелинейной задачи о полях температуры и концентрации активного компонента исследованы физические характеристики бегущей зоны горения, представленной в виде кинематической волны. Приведено уравнение и аналитические выражения для скорости и температуры на фронте бегущего очага горения. Определены физические параметры, определяющие величину скорости фронта, проанализирован вклад каждого из них.

Ключевые слова: теплопроводность, диффузия, горение, скорость фронта, удельная теплота горения, фактор перегрева.

Filippov A.I.

PHYSICAL CHARACTERISTICS OF THE KINEMATIC COMBUSTION WAVE

Based on the solution of the nonlinear problem of the temperature and concentration fields of the active component, the physical characteristics of the traveling combustion zone, presented in the form of a kinematic wave, are investigated. An equation and analytical expressions are given for the velocity and temperature at the front of the running combustion chamber. The physical parameters that determine the value of the front velocity are determined, the contribution of each of them is analyzed.

Key words: thermal conductivity, diffusion, combustion, front velocity, specific heat of combustion, overheating factor

Процессы горения обладают значительным практическим разнообразием. Одним из наиболее интересных и наиболее широко используемым в быту является процесс бегущего горения, индуцируемого фронтовым прогревом. Наибольшее количество результатов получено отечественными и зарубежными учеными [1–5] применительно к горению текущей среды, когда зона горения является неподвижной. В отличие от этих работ здесь предполагается наличие предварительно подготовленной к горению неподвижной однородной среды, в которой зона горения движется с постоянной скоростью, значение которой определяется из соответствующей задачи тепломассопереноса [6, 7].

Тепловой поток в предфронтальной зоне, создаваемый выделяющимся за счет горения теплом, приводит к повышению температуры реагирующей среды до достижения температуры, выше которой реакция горения является самоподдерживающейся. Химические реакции в зоне горения при удалении от фронта затухают по мере расхода горючего вещества. В послепронтальной зоне растет содержание продуктов горения и формируется зона повышенной температуры. Вкладом процессов диффузии при этом пренебрегается.

Простейшая пространственная модель горения представляет равномерное движение бесконечных изотермических плоскостей, так что для его описания можно использовать одномерную модель и процессами теплообмена с окружающей средой можно пренебречь. Предполагается движение изотермических плоскостей из бесконечно удаленной точки слева в правую сторону. Все пространство условно делится на две части некоторой фронтальной плоскостью, такой что вкладом химических реакций справа от этой плоскости можно пре-

небрежь, зато слева – эти процессы являются преобладающими. Уравнение для температурного поля T в такой среде имеет вид

$$c\rho_m \frac{\partial T}{\partial t} - \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = q_T, \quad -\infty < x < \infty. \quad (1)$$

Здесь λ , c , ρ_m – теплопроводность, теплоемкость и плотность горючей смеси. Отметим, что теплофизические параметры, входящие в это уравнение, в общем случае зависят от температуры.

Функция тепловых источников q_T в уравнении (1) определяется химическими реакциями, составляющими процесс горения, и удельной теплотой сгорания смеси L . Определение этой функции в общем случае является сложной самостоятельной задачей, поэтому в данной работе ограничимся простейшей математической моделью, отражающей однако существо цепного характера реакции процесса горения. Известно, что протекание химических реакций определяется их порядком. В большинстве случаев в процессе горения преобладают диффузионные ограничения, в результате которых значение порядка реакции близко к единице. Поэтому можно считать, что скорость изменения плотности или концентрации горючего компонента ρ , который расходуется полностью в процессе горения, если вещества находятся в горючей смеси в нестехиометрическом соотношении, пропорциональна его плотности, а функция источника уравнения для массы представится как произведение плотности на соответствующий кинетический коэффициент α : $q_M = -\alpha(T)\rho$. Знак минус в этом выражении означает, что концентрация горючего вещества убывает.

Далее считаем, что конвективные процессы переноса не вносят заметного вклада, т.е. пренебрегаем изменением макроскопической скорости горючего вещества и продуктов реакции в сравнении с изменениями скорости молекул в процессе горения. Тогда закон сохранения массы или уравнение неразрывности представится в наиболее простом виде, который получен приравнованием плотности источников массы q_M к скорости изменения плотности реагирующего вещества $\partial\rho/\partial t$.

Таким образом, в простейшем случае для реакции первого порядка плотность горючего вещества ρ описывается уравнением

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\alpha(T)\rho, \quad -\infty < x < \infty. \quad (2)$$

В случае установившегося процесса горения движение каждой изотермической поверхности представляется равномерным в среде, предполагающейся неподвижной относительно выбранной системы координат. Это позволяет для описания установившегося (но нестационарного, поскольку в исходном смысле «стационарный» означает «неподвижный») процесса горения использовать волновую координату $\eta = x - vt$ и искать решение в виде кинематической волны. Скорость кинематической волны v совпадет со скоростью движения некоторой условной фронтовой поверхности горения, положение которой в начальный момент времени $t = 0$ совпадает с началом координат $x = 0$. Поскольку координата фронта горения при равномерном движении определяется зависимостью $x_f = vt$, то его положение всегда соответствует нулевому значению волновой координаты: $\eta_f = 0$. Уравнения, описывающие эволюцию полей температуры и концентрации, принимают вид:

$$c(T)\rho_m(T)v\frac{\partial T}{\partial \eta} + \frac{\partial}{\partial \eta}\left(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial \eta}\right) = -L\alpha(T)\rho, \quad (3)$$

$$-\infty < \eta < \infty.$$

$$v\frac{\partial \rho}{\partial \eta} = \alpha(T)\rho, \quad -\infty < \eta < \infty. \quad (4)$$

Введя обозначение $\frac{\partial T}{\partial \eta} = T'_\eta = T'_\eta(T)$, представим уравнение (3) с учетом (4) как

$$c(T)\rho_m(T)vT'_\eta + \frac{\partial}{\partial \eta}(\lambda(T)T'_\eta) = -Lv\frac{\partial \rho}{\partial \eta}, \quad -\infty < \eta < \infty. \quad (5)$$

Сформулированная задача позволяет использовать в качестве независимой переменной температуру T , поэтому уравнение (5) с помощью соотношения для сложной производной $\frac{\partial}{\partial \eta} = T'_\eta \frac{\partial}{\partial T}$ можно представить в виде

$$\left(c(T)\rho_m(T)v + \frac{\partial}{\partial T}(\lambda(T)T'_\eta) + v\frac{\partial \rho}{\partial T}\right)T'_\eta = 0, \quad (6)$$

$$-\infty < \eta < \infty.$$

Уравнение (6) распадается на два уравнения. Первое из них $T'_\eta = 0$ имеет решение $T(\eta) = \text{const}$ и соответствует отсутствию процесса горения. Второе уравнение

$$c(T)\rho_m(T)v + \frac{\partial}{\partial T}(\lambda(T)T'_\eta) + v \frac{\partial \rho}{\partial T} = 0 \quad (7)$$

описывает процесс горения. Таким образом, рассматриваемая термодинамическая система может находиться в одном из двух указанных состояний, соответствующих наличию и отсутствию процесса горения.

Уравнение (7) содержит две неизвестные функции T'_η и ρ , зависящие от температуры T . Интеграл этого уравнения представляется как

$$v \int_C^T c(T)\rho_m(T)dT + \lambda(T)T'_\eta + Lv\rho = const, \quad (8)$$

$$-\infty < \eta < \infty.$$

Выразив константу интегрирования через температуру, достигаемую в процессе горения $T_{-\infty}$ в точке $\eta = -\infty$ ($T'_\eta = 0, \rho = 0$), и начальную температуру приготовленной смеси T_0 ($\eta = \infty, T'_\eta = 0, \rho = \rho_0$), получим

$$\int_C^{T_{-\infty}} c(T)\rho_m(T)dT = \int_C^{T_0} c(T)\rho_m(T)dT + L\rho_0.$$

Отсюда следует соотношение

$$\int_{T_0}^{T_{-\infty}} c(T)\rho_m(T)dT = L\rho_0, \quad (9)$$

связывающее объемную теплоемкость $c(T)\rho_m(T)$ и объемную теплотворную способность горючей смеси $L\rho_0$. Отметим, что скорость v при этом сокращается, а выражение (9), представляющее энергетический интеграл, означает, что вся энергия, выделяющаяся в процессе горения, преобразуется в тепловую энергию, запасенную в продуктах горения.

Нахождение уравнения для скорости требует использования кинетической модели процесса. Для этого с помощью (4) представим выражение (8)

$$v \int_C^T c(T)\rho_m(T)dT + \lambda(T)T'_\eta + \frac{Lv^2\rho'_\eta}{\alpha(T)} = const. \quad (10)$$

Выразив значение константы через температуру $T_{-\infty}$, достигаемую в процессе горения при $\eta = -\infty$ ($T'_\eta = 0, \rho = 0$), получим

$$v \int_C^T c(T)\rho_m(T)dT + \lambda(T)T'_\eta + \frac{Lv^2\rho'_\eta}{\alpha(T)} = v \int_C^{T_{-\infty}} c(T)\rho_m(T)dT.$$

Отсюда имеем уравнение

$$v\alpha(T) \int_{T_{-\infty}}^T c(T)\rho_m(T)dT + \alpha(T)\lambda(T)T'_\eta + Lv^2\rho'_\eta = 0. \quad (11)$$

Проинтегрируем (11) по переменной η в пределах от $-\infty$ до ∞ . Используя интегралы простые интегралы $\int_{-\infty}^{\infty} \alpha(T(\eta))\lambda(T(\eta))T'_\eta d\eta = \int_{T_{-\infty}}^{T_0} \alpha(T)\lambda(T)dT$, $\int_{-\infty}^{\infty} \rho'_\eta d\eta = \rho_0$, получим соотношение

$$Lv^2\rho_0 + v \int_{-\infty}^{\infty} d\eta \alpha(T(\eta, v)) \int_{T_{-\infty}}^{T(\eta, v)} c(\tau)\rho_m(\tau)d\tau + \int_{T_{-\infty}}^{T_0} \alpha(\tau)\lambda(\tau)d\tau = 0, \quad (12)$$

которое представляет неявное уравнение для скорости движения пламени относительно горючей смеси.

Уравнение (12) позволяет сделать важные заключения относительно скорости пламени. Второе слагаемое в (12), представленное пространственным интегралом, свидетельствует о том, что скорость пламени зависит от распределения температуры в зоне горения. По этой причине определение значения скорости пламени требует предварительного определения поля температуры T от координаты η , которое зависит также от искомой скорости v : $T = T(\eta, v)$.

Далее используем средние значения кинетических коэффициентов, определяемое соотношением $\alpha\lambda = \int_{T_{-\infty}}^{T_0} \alpha(\tau)\lambda(\tau)d\tau / (T_{-\infty} - T_0)$ и усредненными значениями объемной теплоемкости $c\rho_m$. Тогда уравнение для скорости с учетом (9) можно представить как

$$1 - \frac{\alpha}{v} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{\alpha}(T(\eta, v)) \frac{T_{-\infty} - T(\eta, v)}{T_{-\infty} - T_0} d\eta + \frac{\alpha\alpha}{v^2} = 0, \quad (13)$$

где $\tilde{\alpha}(T) = \alpha(T)/\alpha$. Отсюда следует выражение для скорости

$$v = \sqrt{\alpha\alpha} \left(\frac{\alpha}{v} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{\alpha}(T(\eta)) \frac{T_{-\infty} - T(\eta)}{T_{-\infty} - T_0} d\eta - 1 \right)^{-1/2}, \quad (14)$$

которое представляет удобство для исследования модельного случая фронтного зажигания среды.

Существо этой модели заключается в следующем. Считается, что в области $\eta > 0$ горение отсутствует и происходит только прогрев смеси подвижным фронтом за счет теплопроводности. В этой области температура повышается от исходной температуры смеси T_0 до некоторой температуры, которую смесь приобретает на плоском фронте $\eta = 0$, которую мы обозначим T_f . Поскольку вкладом химических реакций при $\eta > 0$ можно пренебречь, то следует положить $\alpha = 0$:

$$\alpha(T) = \begin{cases} \alpha, & \eta < 0, T_{-\infty} < T < T_f, \\ 0, & \eta > 0, T_f \geq T > T_0. \end{cases}$$

Значение константы в (8) выразим через $T_{-\infty}$ и для рассматриваемого случая получим

$$v c \rho_m (T - T_{-\infty}) + \lambda T'_\eta + L v \rho = 0, \quad -\infty < \eta < 0. \quad (15)$$

Решение уравнения (4) в этом случае запишется как

$$\rho(\eta) = \begin{cases} \rho_0 \exp\left(\frac{\alpha}{v} \eta\right), & \eta < 0, \\ \rho_0, & \eta \geq 0. \end{cases} \quad (16)$$

С учетом этого решение уравнения (15) имеет вид

$$T - T_{-\infty} = - \frac{L \rho_0}{c \rho_m \left(1 + \frac{\alpha \alpha'}{v^2}\right)} \exp\left(\frac{\alpha}{v} \eta\right), \quad -\infty < \eta < 0. \quad (17)$$

Поскольку при $\eta = 0$ температура принимает значение $T = T_f$, то это решение можно представить как

$$T_{-\infty} - T = (T_{-\infty} - T_f) \exp\left(\frac{\alpha}{v} \eta\right), \quad -\infty < \eta < 0, \quad (18)$$

где $T_{-\infty} - T_f = \frac{L \rho_0}{c \rho_m \left(1 + \frac{\alpha \alpha'}{v^2}\right)}$. Подстановка (18) в (14) с помощью соотношений

$$\frac{\alpha}{v} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{\alpha}(T(\eta)) \frac{T_{-\infty} - T(\eta)}{T_{-\infty} - T_0} d\eta = \frac{\alpha}{v} \int_{-\infty}^0 \frac{T_{-\infty} - T(\eta)}{T_{-\infty} - T_0} d\eta = \frac{T_{-\infty} - T_f}{T_{-\infty} - T_0}$$

приводит к следующим выражениям для скорости

$$\begin{aligned} v &= \sqrt{\alpha \alpha'} \sqrt{\frac{T_{-\infty} - T_f}{T_f - T_0}} = \sqrt{\alpha \alpha'} \sqrt{\frac{T_{-\infty} - T_0}{T_f - T_0} - 1} = \\ &= \sqrt{\alpha \alpha'} \sqrt{\frac{L \rho_0}{c \rho_m (T_f - T_0)} - 1}, \end{aligned} \quad (19)$$

которые согласуются с полученными ранее.

Сопоставляя полученное выражение с (14), получим зависимость для температуры на фронте

$$\begin{aligned} T_f &= T_{-\infty} - \frac{\alpha}{v} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{\alpha}(T(\eta))(T_{-\infty} - T(\eta)) d\eta = \\ &= T_0 + \frac{L}{c\rho_m} - \frac{\alpha}{v} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{\alpha}(T(\eta))(T_{-\infty} - T(\eta)) d\eta, \end{aligned} \quad (20)$$

которое интерпретируется как выражение для температуры зажигания для произвольной зависимости $\alpha = \alpha(T)$, представляющей разнообразие природных процессов горения.

Из выражения (18) следует, что при $\eta = 0$ или $x = vt$, т.е. на фронте горения температура равна $T = T_f$. Величина T_f является одним из важнейших параметров процесса горения и идентифицируется с температурой зажигания горючей среды. Из изложенного следует, что определяемая в рамках рассматриваемой теории величина T_f является эмпирическим параметром и фактическая область ее применения ограничивается рамками предположения о скачкообразном изменении кинетической константы скорости реакции $\alpha(T)$. Если же такую зависимость принять более сложной, то выражение (20) позволяет формально определить температуру T_f , которую можно считать температурой зажигания. Отметим, что существование такой температуры представляется весьма естественным обобщением обычных наблюдений процесса горения. Более глубокий анализ показывает, что полученные решения химико-температурной задачи позволяют найти только соотношения, однозначно связывающие температуру T_f и скорость движения пламени v .

Дальнейшее продвижение в этой области требует решения молекулярной кинетической задачи [6, 7]. Соответствующие физико-химические процессы определяются актами молекулярных взаимодействий, в результате которых выделяющаяся в результате реакции энергия делится между молекулами продуктов реакции. Такие взаимодействия всегда происходят в горючих средах. Возникает горение или нет зависит от способности молекул продуктов реакции, т.е. от их энергии, инициировать вторичные молекулярные акты. Такая способность характеризуется коэффициентом размножения. При достаточно

больших значениях этого коэффициента, т.е. когда в результате реакции рождается более одной молекулы, способной инициировать вторичные процессы, возникает самоподдерживающийся процесс, который мы наблюдаем как горение. В таком представлении процесс горения является цепной реакцией, теория которых развита Н.Н. Семеновым [1]. Детализация механизма реакции требует использования представлений теории протекания. Соответствующая задача выходит за рамки настоящей статьи, поэтому температура зажигания T_z представляется как эмпирический параметр.

В свете изложенного, процесс зажигания связан с энергией молекул, величину которой можно увеличивать процессом нагревания. При повышении температуры энергия молекул достигает таких значений, что реализуются условия протекания реакции в цепном режиме. Такой процесс мы постоянно используем на практике при зажигании среды.

Определение температуры зажигания или скорости в общем случае, согласно (20) и (13), требует нахождения температурного поля, которое приводит к необходимости решения сложных нелинейных уравнений. Если выразить константу интегрирования в (8) через $T_{-\infty}$, воспользоваться равенством $T'_\eta = \frac{\partial T}{\partial \rho} \rho'_\eta$ и уравнением (4), то получим уравнение для определения $T = T(\rho)$

$$v^2 \int_{T_{-\infty}}^T c(T) \rho_m(T) dT + \lambda(T) \alpha(T) \rho \frac{\partial T}{\partial \rho} + L v^2 \rho = 0, \quad (21)$$

$$-\infty < \eta < \infty,$$

построение аналитических решений с учетом зависимости $\alpha = \alpha(T)$ которого проблематично даже для случая постоянных коэффициентов λ, c, ρ_m [9].

Такая возможность предоставляется только в частных случаях. Например, для рассмотренного ранее случая фронтового воспламенения получим уравнение

$$v^2 c \rho_m (T - T_{-\infty}) + \lambda \alpha \rho \frac{\partial T}{\partial \rho} + L v^2 \rho = 0, \quad -\infty < \eta < 0. \quad (22)$$

Нетрудно убедиться, что решением этого уравнения является выражение

$$T - T_{-\infty} = -\frac{L}{c\rho_m\left(1 + \frac{a\alpha}{v^2}\right)}\rho, \quad \eta < 0, \quad (23)$$

совпадающее с (17) с учетом (16). Однако построение аналитического решения для температуры в общем случае представляется очень сложной задачей и сопряжено с необходимостью развития численных моделей.

Для определения поля температуры в области $\eta > 0$ определим константу интегрирования из условия $T \rightarrow T_0$ при $\eta \rightarrow \infty$. Учтем при этом, что плотность горючего компонента на бесконечности равна $\rho \rightarrow \rho_0$. В результате приведем (8) к виду

$$v \int_{T_0}^T c(T)\rho_m(T)dT + \lambda(T)T'_\eta + Lv(\rho - \rho_0) = 0, \quad (24)$$

$$0 < \eta < \infty.$$

В приближении фронтового горения считаем, что плотность горючего компонента остается неизменной $\rho = \rho_0$ во всей области $\eta > 0$, поэтому уравнение для поля температуры запишется как

$$vc\rho_m(T - T_0) + \lambda T'_\eta = 0, \quad 0 < \eta < \infty. \quad (25)$$

Решение этого уравнения представим в виде выражения

$$T - T_0 = (T_f - T_0) \exp\left(-\frac{v}{a}\eta\right), \quad 0 < \eta < \infty, \quad (26)$$

описывающее поле температуры перед фронтом горения.

Выражения (16), (17), (19) и (26) представляют решение задачи о полях температуры для случая воспламенения на фронте горения. Таким образом, представленная модель отражает основные наиболее важные закономерности фронтового горения. Кроме того, она допускает развитие в направлении учета вклада излучения, многофазности горючего вещества и продуктов горения и других факторов.

Библиографический список

1. Семенов Н.Н. Цепные реакции. Ленинград: Госхимтехиздат, 1934.
2. Зельдович Я. Б., Баренблатт Г. И., Либрович В. Б., Махвиладзе Г. М. Математическая теория горения и взрыва. М.: Наука, 1980.
3. Несененко Г.А. Решение задач тепловой теории зажигания реагирующих конденсированных сред "геометро-оптическим" асимптотическим методом. М.: Альфа, 1999.

4. Максимычев А.В., Привезенцев С.С., Черненко Е.В. Особенности горения богатых водородно-воздушных смесей // Труды МФТИ. 2020. Том 12, № 1. С. 53-60.

5. Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. Москва: Наука, 1987.

6. Филиппов А.И. Одномерное температурное поле бегущего безызлучательного теплового горения // Прикладная физика и математика. 2021. № 2. С. 3-11.

7. Филиппов А.И. Обратная задача о скорости бегущей зоны горения // Инженерная физика. 2021. № 4. С. 30-38.

Сведения об авторах

Филиппов Александр Иванович, доктор технических наук, профессор кафедры общей и теоретической физики СФ БашГУ. E-mail: filippovai@rambler.ru.

УДК 532.685

Филиппов А.И., Зеленова М.А.

ПОЛЯ ДАВЛЕНИЯ В НЕФТЕГАЗОВОМ ПЛАСТЕ ПРИ КРАТКОВРЕМЕННОМ ОТБОРЕ ИЗ ПЛАСТА И (ИЛИ) СКВАЖИНЫ

Представлена математическая модель задачи о полях давления в нефтеносном пласте и скважине при отборе из пласта и (или) скважины с учётом влияния НКТ. Случай, рассматриваемый в данной работе, соответствует включению насоса в течение короткого промежутка времени. Такой режим широко используется при исследовании скважин и пластов для определения добычных возможностей углеводородов, особенно в разведочных скважинах. Используемый в данной работе подход позволяет получить выражения для случая, когда время откачки жидкости из пласта или скважины намного меньше, чем время установления равновесия в системе «скважина-пласт».

Ключевые слова: фильтрация, поле давления, «мгновенный» отбор, уравнение пьезопроводности.

Filippov A.I., Zelenova M.A.

**PRESSURE FIELDS IN THE OIL AND GAS FORMATION WITH
A SHORT TERM TREATMENT FROM THE FORMATION AND
(OR) WELL**

A mathematical model of the problem of pressure fields in an oil-bearing reservoir and a well during withdrawal from a reservoir and (or) a well, taking into account the influence of tubing, is presented. The case considered in this work corresponds to turning on the pump for a short period of time. This mode is widely used in the study of wells and reservoirs to determine the production potential of hydrocarbons, especially in exploration wells. The approach used in this work makes it possible to obtain expressions for the case when the time of pumping fluid from the reservoir or well is much less than the time to establish equilibrium in the "well-reservoir" system.

Key words: filtration, pressure field, "instantaneous" selection, piezoconductivity equation.

При разведке и разработке нефтяных месторождений широко используются гидродинамические исследования скважин и пластов среди которых важное место занимает пьезометрия. При осуществлении пьезометрических исследований производится отбор жидкости, заполняющей ствол скважины, при этом осуществляется измерение давления в интервале пласта. Для интерпретации результатов гидродинамического зондирования в таких условиях используется математическая модель заданного отбора из пласта. Реализация режима заданного отбора из пласта невозможна по технологическим причинам, поскольку разработка технических средств, обеспечивающих заданный отбор из пласта, а не из скважины, затруднена.

Целью данной работы является учёт влияния скважинных условий при пьезометрическом зондировании нефтегазовых пластов. Для этого создана математическая модель поля давления в пласте, которая описывает процессы эволюции поля давления при отборе жидкости из скважины, а не из пласта [1–5]. Из физических соображений ясно, что при длительной эксплуатации поля давления для случаев заданных отборов из пласта и скважины сближаются. При малых же временах поля давления в этих случаях существенно различны.

Основное внимание здесь уделено случаю кратковременного отбора, который обычно реализуется при зондировании. Такой случай особенно важен для интерпретации результатов исследований раз-

дочных скважин, поскольку возможности реализации длительного отбора весьма ограничены.

Для простоты здесь рассмотрены только случаи «мгновенных» отборов из пласта и (или) скважины, соответствующие условиям, когда время восстановления давления значительно меньше продолжительности отбора.

Пусть в течение кратковременного отбора жидкости из скважины или пласта извлекается объём $V = \int_0^{t_d} Q(t'_d) dt'_d$. Если этот объём извлекается за короткий промежуток времени – «мгновенно», – то дебит $Q(t_d)$ представляется как произведение объёма извлечённой жидкости на дельта-функцию Дирака $Q(t_d) = V\delta(t_d)$.

В работе [1] приведена постановка задачи и построено решение для случая постоянного отбора из скважины, вскрывшей бесконечный по протяжённости пласт. Математическая постановка задачи о полях давления при упругих фильтрационных течениях в пористом пласте для случая, когда дебит является функцией от времени $Q = Q(t_d)$, причём учитывается кратковременность процесса отбора $Q(t_d) = V\delta(t_d)$, запишется как

$$\frac{\partial P_d}{\partial t_d} - \frac{\langle k \rangle}{\mu m \beta} \frac{1}{r_d} \frac{\partial}{\partial r_d} \left(r_d \frac{\partial P_d}{\partial r_d} \right) = 0, \quad r_0 < r_d < \infty, \quad t_d > 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial P_{1d}}{\partial t_d} - \langle k \rangle \frac{2\pi \rho g H}{\mu S} \left(r_d \frac{\partial P_d}{\partial r_d} \right) \Big|_{r_d=r_0} = -\frac{\rho g V}{S} \delta(t_d), \quad t_d > 0, \quad (2)$$

$$P_d|_{r_d=r_0} = P_{1d}, \quad P_d|_{r_d \rightarrow \infty} = 0, \quad (3)$$

$$P_d|_{t_d=0} = 0, \quad P_{1d}|_{t_d=0} = 0. \quad (4)$$

Если отбор флюида осуществляется из пласта, то математическая постановка примет вид

$$\frac{\partial P_d}{\partial t_d} - \frac{\langle k \rangle}{\mu m \beta} \frac{1}{r_d} \frac{\partial}{\partial r_d} \left(r_d \frac{\partial P_d}{\partial r_d} \right) = 0, \quad r_0 < r_d < \infty, \quad t_d > 0, \quad (5)$$

$$\left(r_d \frac{\partial P_d}{\partial r_d} \right) \Big|_{r_d=r_0} = \frac{\mu V}{2\pi \langle k \rangle H} \delta(t_d), \quad t_d > 0, \quad (6)$$

$$P_d|_{r_d=r_0} = P_{1d}, \quad P_d|_{r_d \rightarrow \infty} = 0, \quad (7)$$

$$P_d|_{t_d=0}=0, \quad P_{1d}|_{t_d=0}=0. \quad (8)$$

Критерии процесса динамики давления в пласте при радиальном течении представляются соотношениями [1]

$$t = \frac{\langle k \rangle t_d}{\mu m \beta r_0^2}, \quad r = \frac{r_d}{r_0}, \quad P = \frac{P_d}{P_0}, \quad P_1 = \frac{P_{1d}}{P_0}, \quad \alpha = m \beta \rho g H \frac{2\pi r_0^2}{S}. \quad (9)$$

Функция для источника [1] в указанных безразмерных переменных при мгновенном отборе получена из следующего соотношения:

$$\begin{aligned} q(t) &= \frac{\rho g \mu m \beta r_0^2}{P_0 \langle k \rangle S} Q \left(\frac{\mu m \beta r_0^2}{\langle k \rangle} t \right) = \frac{\rho g \mu m \beta r_0^2}{P_0 \langle k \rangle S} \frac{\langle k \rangle}{\mu m \beta r_0^2} V \delta(t) = \\ &= \frac{\rho g V}{P_0 S} \delta(t) = U \delta(t). \end{aligned} \quad (10)$$

Здесь использовано следующее свойство $\delta(t)$ -функции: $\delta(ax) = \delta(x)/a$

и введено обозначение $U = \frac{\rho g V}{P_0 S}$. Физический смысл величины U

легко понять, если учесть, что V/S представляет собой снижение уровня газожидкостного раздела в стволе скважины, тогда $\rho g V/S = \Delta P_d$ соответствует падению давления столба жидкости в скважине при отборе насосом объёма V . Величина U в этом случае представляется как $U = \Delta P_d / P_0$, т.е. она описывает относительное снижение давления, вызванное «мгновенным» отбором жидкости объёма V из скважины. Итак, в случае модели «мгновенного» отбора функция источников в безразмерном виде представляется как $q(t) = U \delta(t)$.

С учётом вышесказанного задача для отбора флюида из скважины (1) – (4) в безразмерных переменных запишется следующим образом

$$\frac{\partial P}{\partial t} - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial P}{\partial r} \right) = 0, \quad 1 < r < \infty, \quad t > 0, \quad (11)$$

$$\frac{\partial P_1}{\partial t} - \alpha \left(r \frac{\partial P}{\partial r} \right) \Big|_{r=1} = -U \delta(t), \quad t > 0, \quad (12)$$

$$P|_{r=1} = P_1, \quad P|_{r \rightarrow \infty} = 0, \quad (13)$$

$$P|_{t=0} = 0, \quad P_1|_{t=0} = 0, \quad (14)$$

задача для *отбора из пласта* (5) – (8) примет вид

$$\frac{\partial P}{\partial t} - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial P}{\partial r} \right) = 0, \quad 1 < r < \infty, \quad t > 0, \quad (15)$$

$$\left(r \frac{\partial P}{\partial r} \right) \Big|_{r=1} = \Omega \delta(t), \quad t > 0, \quad (16)$$

$$P|_{r=1} = P_1, \quad P|_{r \rightarrow \infty} = 0, \quad (17)$$

$$P|_{t=0} = 0, \quad P|_{t=0} = 0, \quad (18)$$

где введено обозначение $\Omega = \frac{U}{\alpha} = \frac{V}{2\pi m \beta H r_0^2 P_0}$. Здесь P есть поле давления в нефтеносном слое, P_1 – давление в скважине.

С использованием интегральных преобразований Лапласа–Карсона $f^u(p) = p \int_0^{+\infty} e^{-pt} f(t) dt$ запишем задачи в пространстве изображений. Учтём, что преобразование Лапласа–Карсона дельта-функции Дирака имеет вид

$$\delta^u(p) = p \int_0^{+\infty} e^{-pt} \delta(t) dt = p,$$

где использовано известное соотношение $\int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \delta(t-a) dt = f(a)$, причём интеграл принимается в смысле Лебега, поскольку дельта-функция имеет носитель меры нуль.

Окончательно математическая постановка задачи для «мгновенного» *отбора из скважины* (11) – (14) в пространстве изображений запишется как

$$pP^u - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial P^u}{\partial r} \right) = 0, \quad 1 < r < \infty, \quad (19)$$

$$pP_1^u - \alpha \left(r \frac{\partial P^u}{\partial r} \right) \Big|_{r=1} = -pU, \quad (20)$$

$$P^u|_{r=1} = P_1^u, \quad P^u|_{r \rightarrow \infty} = 0. \quad (21)$$

Аналогичная постановка для кратковременного *отбора из пласта* (15) – (18) примет вид

$$pP^u - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial P^u}{\partial r} \right) = 0, \quad 1 < r < \infty, \quad (22)$$

$$\left(r \frac{\partial P^u}{\partial r} \right) \Big|_{r=1} = p\Omega, \quad (23)$$

$$P^u \Big|_{r=1} = P_1^u, \quad P^u \Big|_{r \rightarrow \infty} = 0. \quad (24)$$

Решение задачи (19) – (21) запишется в форме [1 – 3]

$$P^u = - \frac{pUK_0(r\sqrt{p})}{\sqrt{p}[\sqrt{p}K_0(\sqrt{p}) + \alpha K_1(\sqrt{p})]}, \quad 1 < r < \infty, \quad (25)$$

$$P_1^u = - \frac{pUK_0(\sqrt{p})}{\sqrt{p}[\sqrt{p}K_0(\sqrt{p}) + \alpha K_1(\sqrt{p})]}, \quad 0 < r < 1.$$

Аналогично получено решение задачи (22) – (24) для случая *отбора из пласта*

$$P^u = - \frac{p\Omega K_0(r\sqrt{p})}{\sqrt{p}K_1(\sqrt{p})}, \quad 1 < r < \infty, \quad (26)$$

$$P_1^u = - \frac{p\Omega K_0(\sqrt{p})}{\sqrt{p}K_1(\sqrt{p})}, \quad 0 < r < 1.$$

Полученные решения представляют выражения для расчётов полей давления в пласте P^u и скважине P_1^u в пространстве изображений Лапласа – Карсона для случая мгновенного отбора из пласта (26) или скважины (25). Разработанное к настоящему времени программное обеспечение позволяет использовать выражения в пространстве изображений для численных расчётов полей давления в пласте и скважине.

Библиографический список

1. Филиппов А.И., Ахметова О.В., Ковальский А.А., Зеленова М.А. Поле давления в пласте при заданном дебите скважины // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2020. Т. 6. № 3(23). С. 58-78.
2. Филиппов А.И., Зеленова М.А. Релаксационные процессы в скважине после пуска насоса // Инженерная физика. 2020. № 10. С. 17-22.

3. Филиппов А.И., Зеленова М.А. Численная инверсия квазистационарного температурного поля в тонком анизотропном слое // Математическое моделирование процессов и систем: Материалы X Межд. молодежн. науч.-практ. конф., 27-31 октября 2020 г., г. Стерлитамак / отв. ред. Т.А. Михайлова. – Стерлитамак: Стерлитамакский филиал БашГУ, 2020. С. 274-279.

4. Филиппов А.И., Ахметова О.В., Ковальский А.А., Зеленова М.А. Асимптотическое решение задачи о поле давления в пласте и скважине // Прикладная физика и математика. 2021. № 1. С. 27-37.

5. Филиппов А.И., Ахметова О.В., Ковальский А.А., Зеленова М.А. Моделирование полей давления в нефтеносном пласте с учетом изменения уровня жидкости в скважине // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2021. Т. 7. № 2 (26). С. 95-112.

Сведения об авторах

Филиппов Александр Иванович, доктор технических наук, профессор кафедры общей и теоретической физики СФ БашГУ. E-mail: filippovai@rambler.ru.

Зеленова Марина Анатольевна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей и теоретической физики СФ БашГУ. E-mail: marina_ag@inbox.ru.

УДК 532.685

Филиппов А.И., Зеленова М.А.

СОПОСТАВЛЕНИЕ ПОЛЕЙ ДАВЛЕНИЯ В ПЛАСТЕ ДЛЯ СЛУЧАЕВ МГНОВЕННОГО ОТБОРА ИЗ ПЛАСТА И СКВАЖИНЫ

Представлено сопоставление результатов вычислительных экспериментов по расчётам полей давления в скважине при кратковременном отборе из скважины или пласта. Показана необходимость ревизии методов интерпретации кривых восстановления давления после кратковременного отбора даже при больших временах измерений и необходимость учёта скважинных условий в используемых интерпретационных моделях.

Ключевые слова: фильтрация, поле давления, «мгновенный» отбор, уравнение пьезопроводности.

Filippov A.I., Zelenova M.A.

COMPARISON OF PRESSURE FIELDS IN THE FORMATION FOR CASES OF INSTANT TAKING FROM THE FORMATION AND WELL

Comparison of the results of computational experiments on calculations of pressure fields in a well with short-term withdrawal from a well or reservoir is presented. The need to revise the methods for interpreting pressure build-up curves after short-term sampling, even at long measurement times, and the need to take into account well conditions in the interpretation models used are shown.

Key words: filtration, pressure field, "instantaneous" selection, piezoconductivity equation.

В статье [1] представлено решение задачи о полях давления в нефтегазовом пласте и скважине при кратковременном отборе флюида из скважины и (или) пласта с учётом влияния насосного оборудования.

Проблема заключается в том, что измерение давления в скважине осуществляется при отборе из скважины, в то время как интерпретационная модель предполагает осуществление отбора только из пласта. Физические процессы, определяющие поля давления в рассматриваемых случаях существенно различны. Поэтому важно оценить возможные погрешности, возникающие при использовании интерпретационной модели, основанной на предположении, что отбор осуществляется только из пласта. Для этого в работах [2 – 6] нами предложена принципиально новая модель полей давления, учитывающая особенности используемого скважинного оборудования, которое обеспечивает отбор из скважины, который и определяет приток из пласта.

Представленный случай соответствует включению насоса в течение короткого промежутка времени, когда время откачки жидкости из пласта или скважины намного меньше, чем время установления равновесия в системе «скважина-пласт». При этом получены следующие выражения полей давления в скважине в пространстве изображений Лапласа–Карсона для случая отбора из скважины (P_{1w}^u)

$$P_{1w}^u = -\frac{pUK_0(\sqrt{p})}{\sqrt{p}[\sqrt{p}K_0(\sqrt{p}) + \alpha K_1(\sqrt{p})]}, \quad 0 < r < 1, \quad (1)$$

или отбора из пласта ($P_{1o,r}^u$)

$$P_{1o,r}^u = -\frac{p\Omega K_0(\sqrt{p})}{\sqrt{p}K_1(\sqrt{p})}, \quad 0 < r < 1, \quad (2)$$

где $\Omega = \frac{U}{\alpha} = \frac{V}{2\pi m\beta H r_0^2 P_0}$, V – извлекаемый объём жидкости. Для

удобства построения оригиналов в числителе и знаменателе сохранён множитель $\sqrt{p}$. Выражения (1), (2) представлены в безразмерных переменных с использованием следующих критериев

$$t = \frac{\langle k \rangle t_d}{\mu m \beta r_0^2}, \quad r = \frac{r_d}{r_0}, \quad P = \frac{P_d}{P_0}, \quad P_1 = \frac{P_{1d}}{P_0}, \quad \alpha = m\beta \rho g H \frac{2\pi r_0^2}{S}, \quad (3)$$

$$q(t) = \frac{\rho g V}{P_0 S} \delta(t) = U \delta(t).$$

Развитие теории полей давления при кратковременном отборе из скважины основан на созданной авторами математической модели полей давления в пласте и скважине при заданном отборе жидкости из скважины, а не из пласта, которая более подробно представлена в работах [2 – 6].

Разработанное к настоящему времени программное обеспечение позволяет использовать выражения в пространстве изображений (1), (2) для численных расчётов полей давления скважине. При создании программы для расчётов нами использован алгоритм ден Изигера [7]. На основе разработанной программы выполнены многочисленные вычислительные эксперименты, некоторые результаты которых обобщаются ниже.

На рис. 1 представлена эволюция поля давления в скважине ($r = 1$) при отборе нефтепродуктов из скважины – *сплошные кривые*, или из пласта – *штриховые линии*. Расчёты выполнены при значениях $\alpha = 0.00005292$, что соответствует следующим значениям физических характеристик пласта и скважины: $m = 0.3$; $\mu = 10^{-2}$ Па·с; $\rho = 900$ кг/м³; $\langle k \rangle = 10^{-14}$ м²; $H = 1$ м; $\beta = 10^{-8}$ Н/м²; $r_0 = 0.1$ м.

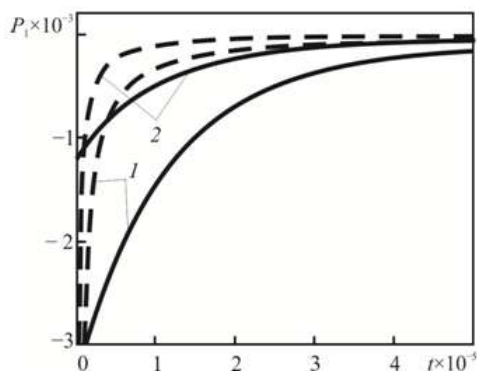


Рис.1. Динамика полей давления в скважине при кратковременном отборе из пласта – *штриховые кривые*, или скважины – *сплошные кривые* при различных значениях извлекаемого объёма: 1 – $V = 9.3 \text{ м}^3$; 2 ($V = 3.3 \text{ м}^3$)

Сравнение соответствующих одинаковым значениям отбора из пласта или скважины (штриховые и сплошные кривые с номерами 1 или 2) иллюстрируют существенное различие значений давления для этих случаев. Кривые иллюстрируют необходимость создания значительно больших перепадов давления для обеспечения заданного отбора из пласта; соответствующие значения перепадов давления для извлечения заданного количества жидкости из скважины существенно ниже.

Сопоставление же сплошных кривых с номерами 1 и 2, а также штриховых с теми же номерами показывает, что при увеличении объёма извлекаемой жидкости величина перепадов давления, растёт как при кратковременном отборе из скважины, так и при кратковременном отборе из пласта. Такая эволюция полей давления представляется естественной и соответствует физическим процессам в скважине.

Итак, сопоставление математических моделей полей давления в при кратковременном отборе из скважины и пласта показывает необходимость совершенствования теоретических представлений и пересмотра методов интерпретации скважинных пьезограмм.

Список обозначений: H – толщина перфорированной области пласта, м; r_0 – радиус скважины, м; S – площадь заполняемого сечения ствола скважины, м^2 ; $\langle k \rangle$ – проницаемость, м^2 ; m – пористость;

β – упругость пористой среды, Па⁻¹; ρ – плотность жидкости, кг/м³; μ – вязкость, Па·с; V – извлекаемый объём жидкости, м³; g – ускорение свободного падения, м/с²; P_1 – давление в скважине, Па; P_0 – нормировочный перепад давления, Па; t – время, с; r – радиальная координата цилиндрической системы, м; U – относительное снижение давления, вызванное «мгновенным» отбором; α – релаксационный параметр; $\delta(t)$ – дельта-функцию Дирака; p – параметр преобразования Лапласа–Карсона. Нижний индекс d (от dimensional – размерный) используется при переходе от размерных величин к безразмерным в случае, когда обозначение величины совпадает в размерной и безразмерной постановке. Нижний индекс w (от well – скважина) используется при обозначении функции давления в случае, когда отбор осуществляется из скважины. Нижний индекс $o.r$ (от oil reservoir) – используется при обозначении функции давления в случае, когда отбор осуществляется из пласта. Верхний индекс u – функция в пространстве изображений Лапласа–Карсона.

Библиографический список

1. Филиппов А.И., Зеленова М.А. «Поля давления в нефтегазовом пласте при кратковременном отборе из пласта и (или) скважины», см. настоящий сборник.
2. Филиппов А.И., Ахметова О.В., Ковальский А.А., Зеленова М.А. Поле давления в пласте при заданном дебите скважины // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2020. Т. 6. № 3(23). С. 58-78.
3. Филиппов А.И., Зеленова М.А. Релаксационные процессы в скважине после пуска насоса // Инженерная физика. 2020. № 10. С. 17-22.
4. Филиппов А.И., Зеленова М.А. Численная инверсия квазистационарного температурного поля в тонком анизотропном слое // Математическое моделирование процессов и систем: Материалы X Межд. молодежн. науч.-практ. конф., 27-31 октября 2020 г., г. Стерлитамак / отв. ред. Т.А. Михайлова. – Стерлитамак: Стерлитамакский филиал БашГУ, 2020. С. 274-279.
5. Филиппов А.И., Ахметова О.В., Ковальский А.А., Зеленова М.А. Асимптотическое решение задачи о поле давления в пласте и скважине // Прикладная физика и математика. 2021. № 1. С. 27-37.

6. Филиппов А.И., Ахметова О.В., Ковальский А.А., Зеленова М.А. Моделирование полей давления в нефтеносном пласте с учетом изменения уровня жидкости в скважине // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2021. Т. 7. № 2 (26). С. 95-112.

Сведения об авторах

Филиппов Александр Иванович, доктор технических наук, профессор кафедры общей и теоретической физики СФ БашГУ. E-mail: filippovai@rambler.ru.

Зеленова Марина Анатольевна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей и теоретической физики СФ БашГУ. E-mail: marina_ag@inbox.ru.

УДК 524.882

Юсупова Р.М., Измаилов Р.Н.

СВОЙСТВА ТОНКОГО АККРЕЦИОННОГО ДИСКА ВОКРУГ ЧЕРНОЙ ДЫРЫ ХЭЙВОРДА

В работе выполнены расчеты по определению физических свойств тонкого аккреционного диска вокруг черной дыры Хэйворда на основе модели Пейдж-Торна. Выявлено влияние масштабного параметра на угловую скорость, энергию связи, угловой момент частиц диска.

Ключевые слова: аккреционный диск, черная дыра Хэйворда, линейный параметр, модель Пейджа и Торна.

Yusupova R.M., Izmailov R.N.

PROPERTIES OF A THIN ACCRETION DISK AROUND A HAYWARD BLACK HOLE

In this paper, calculations are performed to determine the physical properties of a thin accretion disk around a Hayward black hole based on the Page-Thorne model. The influence of the length-scale parameter on the angular velocity, binding energy, angular momentum of particles of the disk is revealed.

Keywords: accretion disc, Hayward black hole, length-scale parameter, Page and Thorne model

Метрика Хэйворда описывает несингулярную черную дыру, была получена Шоном Хэйвордом и опубликована в 2005 году [1]. Решение для черной дыры Хэйворда является регулярным, статичным, сферически симметричным и асимптотически плоским. Метрика не является производной от какой-либо альтернативной теории гравитации, но служит основой для проверки гипотезы об образовании и испарении несингулярной черной дыры как в общей теории относительности, так и вне [1].

Пространство-время Хэйворда имеет следующий вид:

$$ds^2 = -F(r)dt^2 + \frac{dr^2}{F(r)} + r^2 d\Omega^2, \quad (1)$$

$$F(r) = 1 - \frac{2Mr^2}{r^3 + 2l^2M}, \quad (2)$$

где M – масса черной дыры (в данной работе $M = 15M_\odot$) и l – масштабный параметр метрики Хэйворда, $d\Omega^2 = d\varphi^2 + \sin^2\theta d\theta^2$. В данной работе рассматриваются случаи, когда $l = 0$ (случай черной дыры Шварцшильда), $l = 0,5M$, $l = \frac{4}{3\sqrt{3}}M$ и $l = 1M$. Метрика (1)-(2) приближается к решению Шварцшильда при $r \rightarrow \infty$ и плавно приближается к метрике Минковского при $r \rightarrow 0$ и, следовательно, является несингулярной.

Для определения физических характеристик диска была применена модель Пейджа и Торна [2-4] и на ее основе были получены аналитические выражения кинематических параметров, а именно угловой скорости, углового момента и энергии связи частиц диска:

$$\Omega_k = \frac{1}{r} \sqrt{\frac{Mr^2(-4l^2M+r^3)}{(2l^2M+r^3)^2}}, \quad (3)$$

$$L_k = r \sqrt{\frac{Mr^2(-4l^2M+r^3)}{4l^4M^2+4l^2Mr^3+r^5(-3M+r)}}, \quad (4)$$

$$E_k = \frac{2l^2M+r^2(-2M+r)}{\sqrt{4l^4M^2+4l^2Mr^3+r^5(-3M+r)}}. \quad (5)$$

Далее представлены графически (рис.1-3) зависимости угловой скорости, углового момента и энергии связи частиц от радиальной координаты, соответственно.

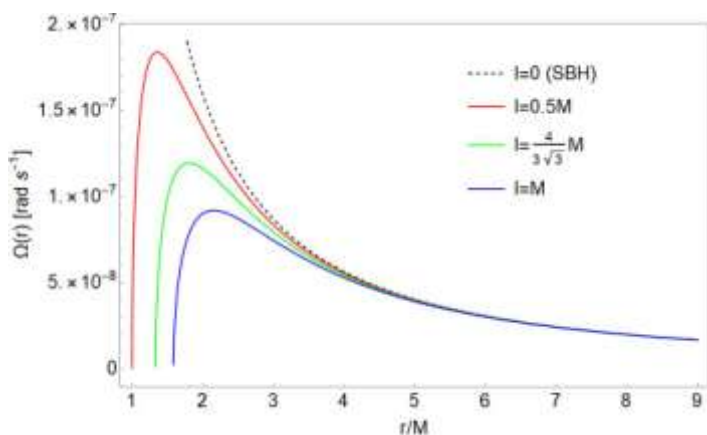


Рис. 1. График зависимости угловой скорости частиц тонкого аккреционного диска от радиальной координаты r для различных значениях параметра l

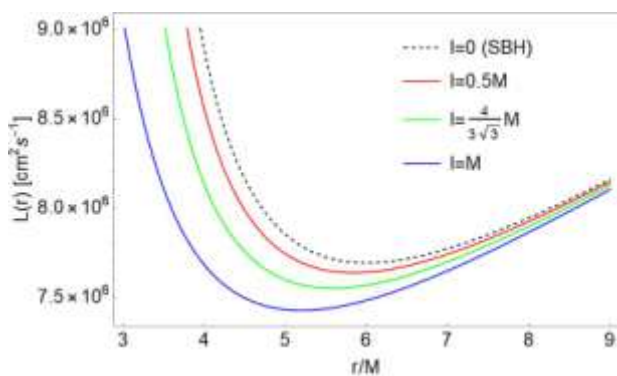


Рис. 2. График зависимости углового момента частиц тонкого аккреционного диска от частоты излучения ν для различных значениях параметра l

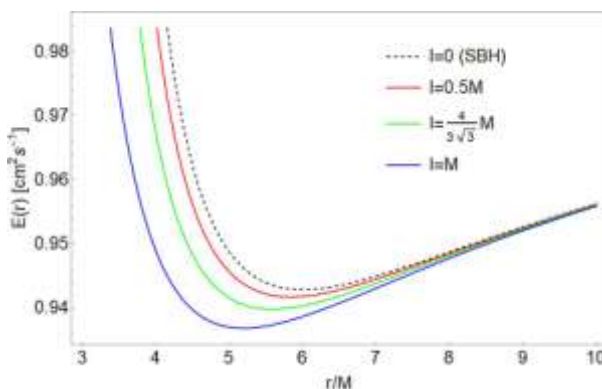


Рис. 3. График зависимости энергии связи частиц тонкого аккреционного диска от частоты излучения ν для различных значениях параметра l

В работе было показано влияние масштабного параметра на физические свойства аккреционного диска черной дыры Хэйворда. Согласно полученным данным с увеличением значения масштабного параметра угловая скорость частиц, угловой момент и энергия связи частиц диска уменьшаются.

Библиографический список

1. Hayward S.A. Formation and evaporation of non-singular black holes // Physical Review Letters. 2006. V.96. P. 031103.
2. Page D. N., Thorne K. S. Disk-Accretion onto a Black Hole. Time-Averaged Structure of Accretion Disk // The Astrophysical Journal. 1974. V. 191. P. 499–506.
3. Karimov R.Kh., Izmailov R.N., Potapov A.A., Nandi K.K. Can accretion properties distinguish between a naked singularity, wormhole and black hole? The European Physical Journal C. 2020. V.80. P. 1138.
4. Юсупова Р.М., Измаилов Р.Н. Физические свойства тонкого аккреционного диска черной дыры Тауб-НУТ // Известия Уфимского научного центра РАН. 2021. № 1. С. 87-91.

Сведения об авторах

Юсупова Розалия Мансуровна, аспирант ИФМК УФИЦ РАН (Уфа). E-mail: yu.rose@mail.ru.

Измаилов Рамиль Наильевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики и нанотехнологий БГПУ им. М.Акумлы (Уфа). E-mail: izmailov.ramil@gmail.com.

УДК 616.1

Ягафарова З.А., Нигматуллина Л.И., Нигматуллина Г.Р.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЯВЛЕНИЯ ОБЛИТЕРАЦИИ ПРИ ЛЕЧЕНИИ СОСУДИСТЫХ ПАТОЛОГИЙ

В статье рассматривается использование облитерации при лечении сосудистых патологий. На основе численного эксперимента определены параметры этого процесса, получены зависимости толщины адсорбционного слоя и скорости облитерации от времени при различных степенях заболевания.

Ключевые слова: облитерация, сосудистые патологии, варикоз нижних конечностей, адсорбционный слой.

Yagafarova Z.A, Nigmatullina L.I., Nigmatullina G.R.

THE USE OF THE PHENOMENON OF OBLITERATION IN TREATMENT OF VASCULAR DISEASES

The article discusses the use of obliteration in the treatment of vascular pathologies. On the basis of a numerical experiment, the parameters of this process were determined, the dependences of the thickness of the adsorption layer and the rate of obliteration on time were obtained for various degrees of the disease.

Key words: obliteration, vascular pathologies, varicose veins of the lower extremities, adsorption layer.

В настоящее время заболевания сердечно-сосудистой системы являются одной из основных причин заболеваемости, инвалидизации и смертности. Сердечно-сосудистые заболевания – это группа патологий, включающая функциональные нарушения миокарда, сосудов, артерий и вен. Их семиотика и клиника весьма разнообразны[1].

Циркуляция крови в организме человека является достаточно сложной системой, малейший сбой которой может привести к серьёзным последствиям. Наиболее распространёнными социально значимыми сердечно-сосудистыми заболеваниями являются: гипертоническая болезнь, атеросклероз, ишемическая болезнь сердца, венозное расширение вен и прочее. Например, проблемы с сосудами могут возникнуть при их полной или частичной закупорке, что может про-

изойти из-за жировых отложений, так называемых атеросклеротических бляшек или при варикозном расширении[2].

Современная медицина обладает различными способами лечения подобных заболеваний. К одним из них относится радиочастотная облитерация (РЧО). Это новейший внутрисосудистый метод терапии, является миниинвазивным и эффективным методом лечения варикозного расширения вен [3]. РЧО включает в себя радиоволны и микроволны, находящиеся на низкоэнергетическом конце электромагнитного спектра и является разновидностью неионизирующего излучения. Радиочастотный ток поступает в полость вены с помощью специального катетера, введенного в вену иглой. Катетер перемещается вверх на высоту, равную прогнозируемой длине вены, которую необходимо удалить. Затем включается генератор и начинает действовать ток, который нагревает стенки сосудов до 120 градусов Цельсия. Применяется для термической деструкции вен диаметром от 4 до 20 мм при заболеваниях варикозного расширения.

Возникновение облитерации в узких щелях и капиллярах широко рассмотрено в литературе[4], и объясняется тем, что при движении жидкости в узких зазорах происходит ее электризация. Согласно теории, в зависимости от активности материала зазоров, поверхностный слой жидкости может приобретать положительную или отрицательную полярность. В результате электрического и молекулярного взаимодействия происходит адсорбция этого слоя на поверхность, т. е. детали приобретают поверхностный потенциал первого слоя жидкости. При трении жидкости в зазоре, последующий слой ее приобретает противоположный первому слою потенциал и также адсорбируется на первом слое. Таким образом, происходит наложение слоев жидкости, полярность которых чередуется. На границах разнополярных слоев возникают запорные слои, подобные запорным слоям в диодах и транзисторах. Число слоев ограничивается равенством сил сцепления последнего слоя с предыдущим в пограничном слое и сил вязкости этого слоя основным потоком жидкости в зазоре. Как показывают наблюдения, при протекании жидкостей, их смесей и растворов, через каналы происходит уменьшение объемной скорости истечения, которое часто приводит к полной облитерации капиллярной системы. Для вполне чистых жидкостей, не способных к адсорбции на твердых стенках, эти явления могут получить чисто физическое объяснение как результат влияния поля твердой фазы. При наличии в

жидкости растворенного вещества, способного к адсорбции, явление облитерации легко объясняется образованием адсорбционных слоев.

В работе [4] показано, что толщина адсорбционного слоя и других рыхлых структур на поверхностях щелевых уплотнений определяется следующей зависимостью:

$$h = h_{\max} [1 - \exp(-\alpha t)],$$

где $h_{\max}$ – максимальная толщина адсорбционного слоя; t – время после начала течения жидкости; α – коэффициент пропорциональности, зависящий от материала зазора и свойств жидкости.

В данной работе проведен численный эксперимент по исследованию процесса облитерации при различных значениях диаметров вен, соответствующих четырем степеням заболеваний варикозного расширения вен.

На рис.1 приведен график зависимости толщины адсорбционного слоя от времени при различных степенях заболевания. Время облитерации: $t = 0 - 20$ мин.

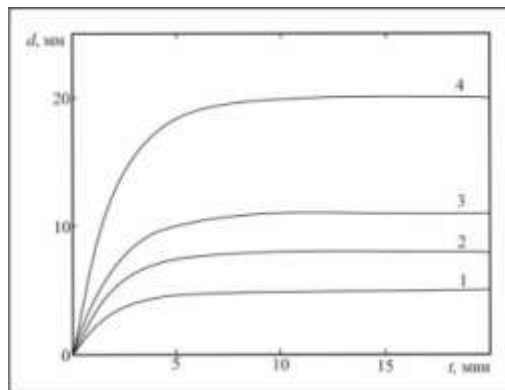


Рис.1. Зависимость зарастания адсорбционного слоя от времени при различных степенях заболевания

Согласно [4] величина зазора с течением времени будет изменяться по следующей зависимости:

$$\delta = \delta_n - 2h_{\max} [1 - \exp(-\alpha t)],$$

а скорость его зарастания следующим уравнением:

$$\delta^0 = 2\alpha h_{\max} \exp(-\alpha t)$$

На рис. 2 приведён график зависимости скорости облитерации вен от времени. Время облитерации: $t = 0 - 15$ мин.

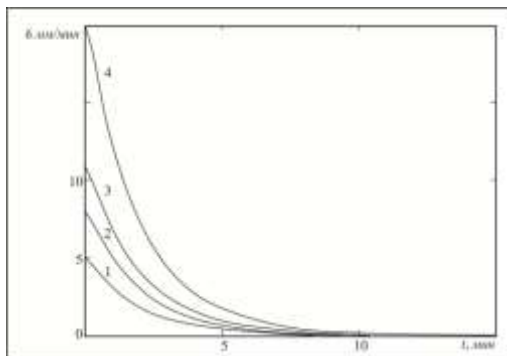


Рис. 2. Скорость облитерации в зависимости от времени при различных степенях заболевания

Таким образом, рассчитаны и определены некоторые параметры процесса облитерации, широко используемого при лечении варикоза нижних конечностей. Метод облитерации, обладая рядом существенных преимуществ, является перспективной альтернативой традиционной операции по удалению вен.

Библиографический список

1. Берган Дж. Лечение наружного кровотечения из варикозно расширенных вен / Дж. Берган // Ангиология и сосудистая хирургия. – 2000. – Т.6, №2. – С. 53-60.
2. Флебология: руководство для врачей / под ред. В.С. Савельева. – М.: Медицина, 2001. – 205 с.
3. Ремизов А.Н., Максина А.Г., Потапенко А.Я. Учебник по медицинской и биологической физике. – М.: Дрофа, 2003. – 45 с.
4. Никитин Г.А. Щелевые и лабиринтные уплотнения гидроагрегатов. – М.: Машиностроение, 1982 – 135 с.

Сведения об авторах

Ягафарова Зульфия Абдулхаевна, кандидат физико-математических наук, доцент СФ БашГУ (Стерлитамак), E-mail: zulfiya_abdul@mail.ru.

Нигматуллина Лейсян Ирековна, магистрант, E-mail: leysan.nigmatullina.99@mail.ru.

Нигматуллина Гульшат Рамазановна, студент, E-mail: gulchat1511@mail.ru.

УДК 538.913

Якшибаев Р.А., Биккулова Н.Н., Акманова Г.Р., Сафаргалиев Д.И.

ЗОННАЯ СТРУКТУРА КВАНТОВЫХ ТОЧЕК ТЕЛЛУРИДА СЕРЕБРА

В работе представлены результаты расчетов зонной структуры квантовых точек теллурида серебра.

Ключевые слова: суперионные проводники, фазовая диаграмма, зонная структура, квантовые точки.

Yakshibaev R.A., Bikkulova N.N., Akmanova G.R., Safargaliev D.I.

ZONE STRUCTURE OF SILVER TELLURIDE QUANTUM DOTS

The paper presents the results of calculations of the band structure of quantum dots of silver telluride.

Key words: superionic conductors, phase diagram, band structure, quantum dots.

Сегодня человечество стоит на пороге второй квантовой революции, и квантовые технологии, являясь междисциплинарной областью исследований, расширяются и начинают охватывать все большее и большее количество аспектов науки и техники.

Под квантовой сенсорикой понимается создание сенсоров, датчиков, измерительных приборов, основанных на квантовых эффектах. Квантовые системы очень легко взаимодействуют со средой, и при помощи них можно измерять различные свойства тех объектов, с которыми квантовая система взаимодействует [1]. Квантовые сенсоры,

как ожидается, будут иметь высокое пространственное и временное разрешение, что позволит максимально повысить точность и частоту измерений. Это, в свою очередь, приведет к появлению широкого ряда неинвазивных методов измерения произвольных свойств заданных объектов.

Поскольку квантовые системы имеют очень маленькие размеры, они могут быть встроены в состав наномашин, выполняющих различные функции внутри объектов исследования и управления. Тем самым может быть построен обычный кибернетический контур управления, при помощи которого управление может быть осуществлено в режиме реального времени.

Сегодня квантовые датчики представлены довольно громоздкими устройствами, самыми известными из которых являются квантовые или атомные часы, квантовые стандарты времени и частоты, квантовые магнитометры и сенсоры других полей, а также любые измерительные приборы, основанные на лазерах. Уже сегодня такие приборы показывают необычайную точность измерений, и при этом ведутся работы по их миниатюризации.

Немалый интерес представляют собой халькогениды меди и серебра в связи с разнообразием их физико-химических свойств. Перспективными материалами для создания КТ могут служить теллуриды серебра. Обзор литературы свидетельствует о том, что данные соединения на сегодняшний день мало исследованы в качестве квантовых сенсоров. Однако, в последнее время эти соединения привлекают внимание исследователей в качестве термоэлектрических материалов с высокой добротностью. Уменьшение размеров частиц приводит к повышению добротности этих материалов. Возможно, что использование этих соединений в качестве квантовых сенсоров откроет большие возможности для использования в разных приложениях.

Данная статья посвящена расчету зонной структуры теллурида серебра в наносостоянии. В качестве объекта исследования выбран смешанный суперионный проводник теллурид серебра, обладающий кубической гранецентрированной решеткой в суперионном состоянии. Проведены модельные расчеты зонной структуры наноточек теллурида серебра в зависимости от расстояния между квантовыми точками.

Модельные компьютерные расчеты проведены с помощью программы Quantum Espresso [2].

При высоких температурах Ag_2Te имеет ГЦК структуру (рис.1(а)). В ГЦК решетке, образованной анионом Te катионы Ag занимают тетраэдрические позиции. Структура Ag_2Te для наноточки приведена на рис 1(б).

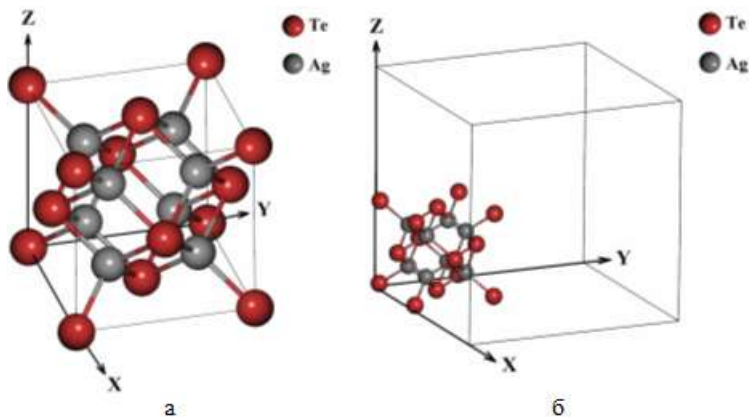


Рис.1. Структура Ag_2Te : а) для кубической структуры; б) для наноточки

На рис.2 представлена зонная структура для объемного теллурида серебра.

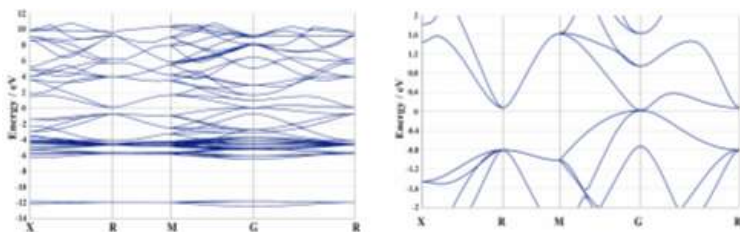


Рис. 2. Зонная структура для Ag_2Te (кубическая структура)

Зонная структура для наноточки Ag_2Te ($7\text{\AA}$) представлена на рис.3.

Результаты исследования свидетельствуют о том, что электронная структура теллурида серебра характеризуется гибридизацией р-уровней теллурида и d-уровней серебра. Анализ полученной парци-

альной и полной плотности электронных состояний показывает, что *pd*-гибридизация сильнее проявляется в теллуридах серебра, чем в теллуридах меди.

Расчет зонной структуры показал, что соединение теллурида серебра является бесщелевым полупроводником.

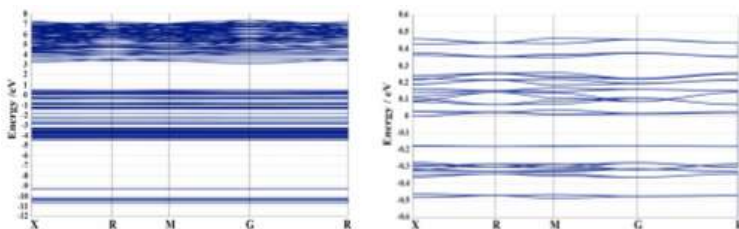


Рис. 3. Зонная структура для наноточки Ag_2Te ($7\text{\AA}$)

Зонные структуры смоделированных наноточек теллурида серебра являются полностью дискретными, вид зонной структуры и ширина запрещенной зоны зависят от состава соединений и размера частиц.

Работа подготовлена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-32-90216.

Библиографический список

1. Брандт Н.Б., Кульбачинский В.А. Квазичастицы в физике конденсированного состояния. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. 632 с.
2. Quantum-ESPRESSO [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.quantum-espresso.org>.

Сведения об авторах

Якшибаев Роберт Асгатович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры общей физики физико-технического института БашГУ, E-mail: yakshibaev5252@mail.ru.

Биккулова Нурия Нагимовна, доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой общей и теоретической физики Стерлитамакского филиала БашГУ. E-mail: bickulova@mail.ru.

Акманова Гузель Рифкатовна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей физики физико-технического института БашГУ. E-mail: grakmanova@mail.ru.

Сафаргалиев Данир Ильдарович, аспирант кафедры общей физики физико-технического института БашГУ. E-mail: danirsafargaliev@gmail.com.

Секция 2

«ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ: ДОСТИЖЕНИЯ И ПРОБЛЕМЫ ИНТЕГРАЦИИ НАУКИ, ТЕХНИКИ И ПРОИЗВОДСТВА»

УДК 621.373

Антонов К.В., Грабовская А.П., Жумабаев Д.Д.

ОЦЕНКА НЕФТЕНАСЫЩЕННОГО ПОТЕНЦИАЛА МЕЖСКВАЖИННОГО ПРОСТРАНСТВА СЕЙСМИЧЕСКИМ ЗОНДИРОВАНИЕМ

На основании математических расчетов динамического взаимодействия поровой жидкости и упругой среды (фильтрационные смещения на фронте волны, деформации флюидонасыщенной пористой среды), лабораторных исследований и промысловых испытаний обоснована возможность выделения и оценки нефтенасыщенных локальных участков в разрезе залежи, нефти которые по разным причинам оказались не вовлеченными или не извлеченными при разработке месторождения.

Ключевые слова: скважина, залежь, нефть, вода, флюид, керн, пористая среда, сейсмическое зондирование.

Antonov K.V., Grabovskaya A.P., Zhumabaev D.D.

ESTIMATION OF THE OIL-SATURATED POTENTIAL OF THE INTER-WELL SPACE BY SEISMIC SOUNDING

Based on mathematical calculations of the dynamic interaction of a pore liquid and an elastic medium (filtration displacements at the wave front, deformations of a fluid-saturated porous medium), laboratory studies and field tests, the possibility of identifying and evaluating oil-saturated local areas in the section of a Deposit, which for various reasons were not involved or extracted during the development of the field, is substantiated.

Keywords: well, Deposit, oil, water, fluid, core, porous medium, seismic sounding.

К семидесятым годам прошлого столетия сложилась структура мировой энергетики, в которой нефть приобрела значение главного энергоносителя. Превращение нефти в основной источник энергии

было predeterminedено ее экономическими и технологическими преимуществами перед твердым топливом по критериям универсальности использования, транспортабельности, экологичности, что в наибольшей степени соответствовало потребностям современного производства.

Высокая результативность развития жидких углеводородов сырьевой базы стала возможной благодаря совершенствованию стратегических направлений, методики и техники геологоразведочных работ. Научно-технический прогресс в важнейших областях нефтегазовой геологии, геофизики, бурения, разработке месторождений подготовил техническую базу для вовлечения в геологоразведочный процесс наиболее сложных по геологическим, климатическим и технико-экономическим условиям перспективных районов, реализация которых принесла ощутимый результат [5].

Не последнее место в этих мероприятиях отведено и мероприятиям по ускоренному вводу открываемых месторождений в разработку, совершенствованию технологии разработки а также приборов и методов контроля.

К настоящему времени значительная часть нефтяных месторождений вступила в позднюю или завершающую стадию разработки где не последнее место отводится методам изучения месторождений, длительно находящихся в эксплуатации или вступивших в позднюю стадию разработки. В этих условиях особое значение приобретает полнота знаний особенностей геологического строения и динамически процессов, связанных с потоками флюидов протекающих в залежи, совершенства методов контролирующих и управляющих данным процессом. Одним из таких направлений представляется сейсмическое зондирование нефтенасыщенности, как действенное решение проблемы выявления и вовлечения в разработку зон, по разным причинам не вовлеченных в разработку или значительно отличающихся в силу неуставленных некоторых особенностей геологического строения, а значит и режимами разработки несоответствующими требуемым условиям.

Данная постановка вопроса имеет прямое отношение к проблеме участков, на которых осуществляется восстановление длительно неработавших – законсервированных, аварийных и бездействующих по разным причинам скважин, детальное зондированием участка недр их расположения и оценка которых позволит вновь вовлечь их в разработку и повысить степень извлечения нефти из недр.

Современные методы позволяют гораздо более детально оценить внутренний рельеф, изучить межскважинные пространства и заглянуть за установленные контуры месторождения.

Причиной образования неустановленных зон-останцов является локальное отличие фильтрационно-емкостных свойств продуктивного коллектора, а следовательно, обтекание такой зоны потоком нефти извлекаемой ближайшими работающими скважинами. В работе рассматривается технология сейсмического зондирования нефтенасыщенности, предназначенная для проведения волнового межскважинного каротажа в эксплуатационных или вводимых в эксплуатацию, а также в бурящихся или восстанавливаемых из консервации скважинах.

Методика зондирования заключается в инициировании пакета взрывных волн ступенчатой амплитуды в скважине возбуждения и регистрации скорости и времени прохождения волны в скважинах приема сигнала. По изменению скорости распространения волны в межскважинном пространстве в зависимости от амплитуды судят о наличии и составе флюида в порах либо о проницаемости пористой среды.

Указанные зависимости параметров скорости, ее амплитуды, проницаемости упругой среды и вязкости флюида основаны на исследовании и установлении эффекта фильтрационных перетоков жидкости на фронте волны в зависимости от ее амплитуды, проницаемости среды и вязкости флюида.

На основе исследований процессов гидродинамики вязкой жидкости в поровом пространстве при динамическом(волновом) воздействии на насыщенную пористую среду было открыто новое (ранее неизвестное) явление взаимосвязи величины скорости распространения волны и ее амплитуды, свойственное данному флюиду насыщения [1, 2, 8].

На рис.1 представлен элементарный объем упругой пористой среды, в разрезе, при его волновом возмущении, в котором поровые границы совершают волновые колебания, образуя соответственно области сжатия и разряжения. Жидкая фаза заполняет поровое пространство и имеет возможность перетекать в динамике волны из области ее сжатия в области разряжения. Данные перетоки будут вносить вклад в общую деформацию всего объема, а значит в сжимаемость среды и соответственно в скорость распространения волны для данного заполняющего поры флюида. Таким образом, при изменении волновой нагрузки, величины волновых возмущений (амплитуды

волны) происходит процесс инициирования фильтрационных перетоков на фронте волны, что определяет изменение сжимаемости среды, а значит изменения скорости распространения волны, свойственную данному флюиду.

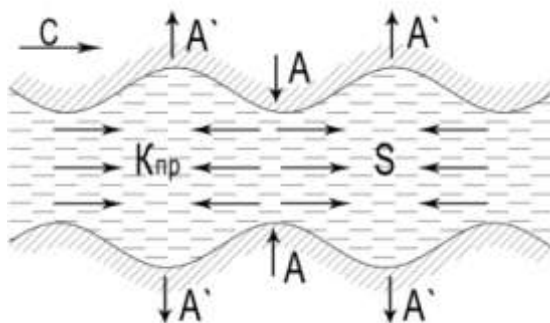


Рис. 1. Микроструктурная схема динамики упругой пористой среды, насыщенной жидкостью:

A – амплитуда волны; S – фильтрационные смещения жидкой фазы из области сжатия волны в область разрежения; $K_{пр}$ – проницаемость порового канала для данного флюида; C – скорость распространения упругой волны, как функция сжимаемости среды (изменение порового объема, обусловленное фильтрационными перетоками жидкости)

Такой вывод взят за основу разработки процесса волнового зондирования насыщенной упругой среды для определения насыщающего ее флюида. На рисунках 2 и 3 приведены графики лабораторных исследований акустического и взрывного зондирования на естественных и искусственных кернах горных пород [3, 4, 6].

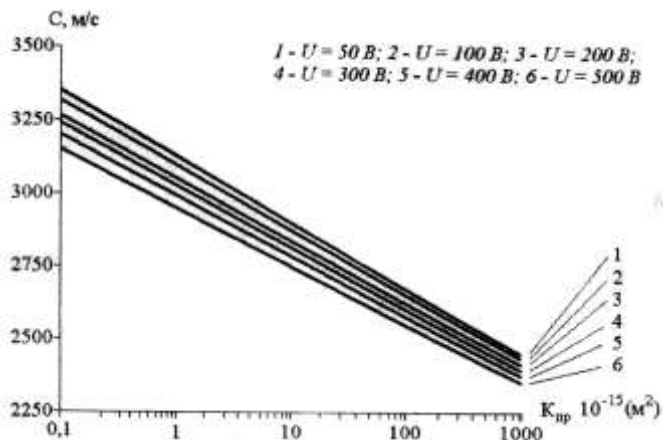


Рис. 2. Результаты лабораторных экспериментов акустических волн, частотой 500 кГц в кернах горных пород, насыщенных нефтью.

Видна зависимость скорости волны от ее амплитуды и проницаемости среды

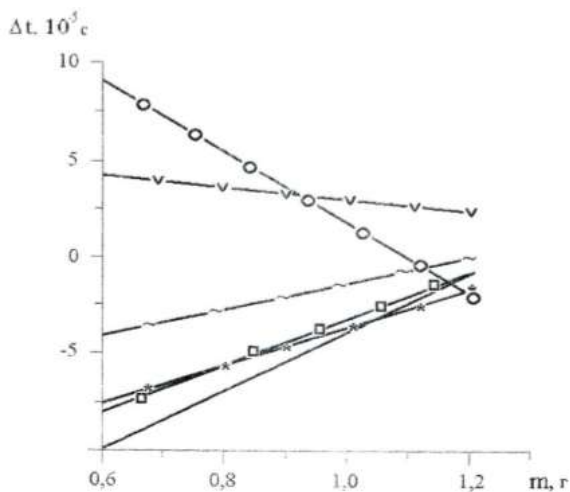


Рис. 3. Исследование приращения времени распространения взрывных волн в кернах горных пород, в зависимости от амплитуды импульсов и проницаемости среды

Опробование методики, проведенное в паре промысловых обсаженных скважин на Александровской площади Туймазинского месторождения с помощью серии взрывов ВВ с различной массой (рис.4), показало, что приращение времени распространения продольных волн Δt_p или уменьшение ΔV_p при сеймопросвечивании действительно является функцией амплитуды воздействия на проницаемый пласт, параметром (показателем) которой является эффективная проницаемость, учитывающая характер насыщенности пласта.

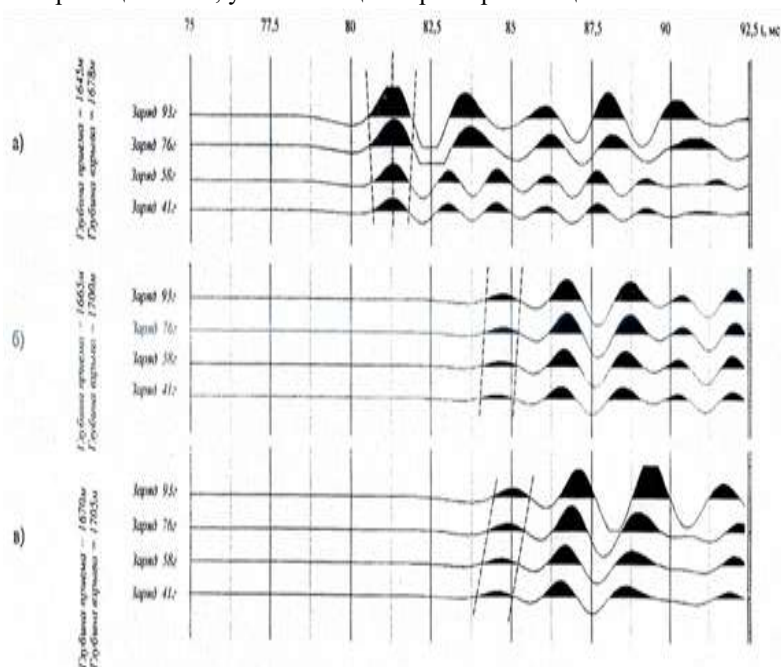


Рис. 4. Результаты межскважинного сеймопросвечивания пластов в скважинах 2446 и 2466 Александровской площади Туймазинского месторождения:

- (жирным выделены вторые полупериоды первых вступлений продольных волн)
- а) – непроницаемого пласта аргиллита – известняка;
 - б) – нефтенасыщенного пласта песчаника над ВНК;
 - в) – водонасыщенного пласта песчаника под ВНК

Способ включает выбор пунктов возбуждения и приема сейсмических волн, воздействие на исследуемую среду путем ступенчатого изменения амплитуды волны, регистрации изменения скорости распространения волны в зависимости от изменения амплитуды, которое и определяет наличие и характер флюидонасыщения. При этом толщину нефтенасыщенной залежи устанавливают за счет перемещения источников и приемников сейсмических волн по глубине скважины от верхней границы отсутствия нефтенасыщенности до последнего уровня ее присутствия. Площадь опоискования, оконтуривания залежи определяют выбором размещения скважин регистрации вначале в близлежащих скважинах, а затем в более удаленных скважинах, и по совокупным данным окончательно определяют границы размещения залежи углеводородов, как по глубине (мощности) пласта так и по площади опоискования, оконтуривания и строят объемное (3D) отображение залежи по которому рассчитывают количество углеводородов.

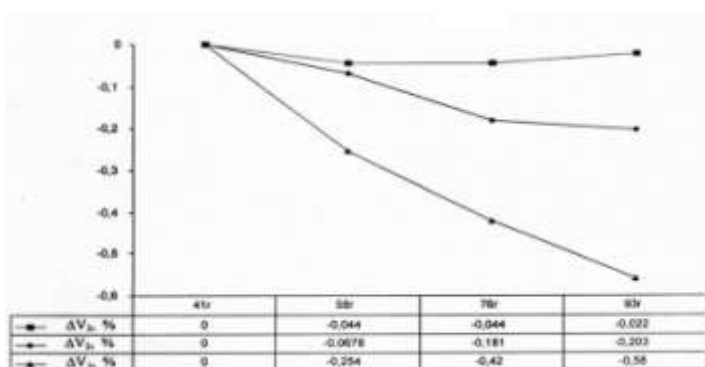


Рис. 5. Зависимость относительного уменьшения скорости в зондируемых пластах водонасыщенного, нефтенасыщенного песчаника и непроницаемого аргиллита – известняка от массы заряда

Разработана, опробована и доказана методика сейсмического зондирования нефтенасыщенности, состоящая в ступенчатом по амплитуде воздействия взрывных волн и по изменению скорости распространения волны в межскважинном пространстве судят о наличии и составе флюида при известной проницаемости среды, либо о проницаемости пористой среды при заданных свойствах флюида; по-

следнее условие требует предварительной тарировки зондирования [3,7].

Использование предлагаемой методики сейсмического зондирования нефтенасыщенности позволит существенно повысить информативность геофизических исследований, снизить затраты на них, так что экономический эффект от его использования может быть значительным.

По результатам опробования методики в паре скважин на Александровской площади, можно отметить, что приращение Δt_p или уменьшение ΔV_p действительно является функцией амплитуды воздействия на проницаемый пласт, параметром (показателем) которой является эффективная проницаемость, т.е. $K_{пр} = f(\Delta t_p, \Delta A_p)$. Но для определения проницаемости $K_{пр}$ целесообразно использовать не абсолютную или относительную величину полного приращения Δt_p или уменьшения ΔV_p , а ее градиент, т.е. величину, приведенную к единице изменения амплитуды ΔA_p продольных волн, так как абсолютное значение амплитуды ΔA_p зависит не только от массы заряда, но и от условий возбуждения и приема сейсмических колебаний в просвечиваемых скважинах и прочих факторов.

Библиографический список

1. Азаматов А.Ш., Антонов К.В., Гафуров Р.Р. и др. Способ определения проницаемости пористой среды с помощью акустического каротажа / Науч.-практ. конф. 21-25 апреля 1997 г. Малоизученные нефтегазоносные комплексы Европейской части России (прогноз нефтегазоносности и перспективы освоения). Тезисы докладов. – М.: ВНИГНИ. – 1997. – С. 128–129.
2. Антонов К.В., Гафуров Р.Р., Халилов В.Ш. Акустический метод определения проницаемости горных пород/ Всероссийская научно-техническая конференция. Проблемы нефтегазового комплекса России. 16–17 ноября 1995 г. Тезисы докладов. – Уфа: УГНТУ. – 1995. – С. 61.
3. Бандов В.П., Халилов В.Ш. Микроструктурные особенности распространения волн в насыщенной пористой среде / В.П. Бандов, В.Ш. Халилов // Акустический журнал. – 1992. – Т. 38. – № 6. – С. 975–983.
4. Кузнецов О.Л., Симкин Е.М., Халиков Г.А. и др. Двухволновая структура фронта упругой волны в насыщенной зернистой среде / О.Л. Кузнецов, Е.М. Симкин, Г.А. Халиков и др. // Акустический журнал. – 1982. – Т. 28. – Вып. 6.

5. Минерально-сырьевая база топливно-энергетического комплекса России. Состояние и прогноз / Гл. редакторы В.З. Гарипов, Е.А. Козловский – М., 2004. – 548 с.

6. Патент № 2132560 РФ. Способ оценки проницаемости горных пород / В.Ш. Халилов, Р.Р. Гафуров, К.В. Антонов и др. – № 97104988, заявлено 24.03.97. № 97104988, Опубликовано. 27.06.99. Бюл. № 18. – С. 436.

7. Халиков Г. А., Халилов В. Ш. Упругая деформация зернистой среды, насыщенной жидкостью / Г.А. Халиков, В.Ш. Халилов // ПМТФ. – 1985. – № 5. – С. 129–134.

8. Халилов В.Ш., Гафуров Р.Р., Антонов К.В. и др. Скважинные исследования фильтрационных свойств горных пород / 300 лет горно-геологической службе России. Международная геофизическая конференция. Тезисы докладов. – Санкт-Петербург, 2-6 октября 2000 года. – Санкт-Петербург: ООО "Издательство Welcome". – 2000. – С. 406-408.

Сведения об авторах

Антонов Константин Васильевич, кандидат технических наук, доцент БашГУ. E-mail: antonov-k-v@mail.ru.

Грабовская Анастасия Петровна, студент 3 курса по специальности ФЭП БашГУ. E-mail: grabovs-43@mail.ru.

Жумабаев Дулат Дауренович, студент 3 курса по специальности ФЭП БашГУ. E-mail: dulat_zxz@mail.ru.

УДК 621.373

Антонов К.В., Грабовская А.П., Жумабаев Д.Д.

ДИНАМИКА ДОБЫЧИ НЕФТИ И ПОТЕНЦИАЛ УГЛЕВОДОРОДНОГО СЫРЬЯ НЕДР БАШКОРТОСТАНА

В работе анализируется состояние начальных и остаточных запасов нефти и природного газа, представлены данные по изученности недр Башкортостана поисково-разведочным, эксплуатационным и структурным бурением, сейсморазведкой, а также динамика добычи нефти за весь период становления и развития нефтегазодобывающей отрасли республики. Сделан осторожный прогноз на ближайшую перспективу об уровне добычи нефти.

Ключевые слова: недра, нефть, природный газ, месторождение, запасы, ресурсы, коллекторы, скважина, дебит, бурение, разработка, выработанность, обводненность.

Antonov K.V., Grabovskaya A.P., Zhumabaev D.D.

**DYNAMICS OF OIL PRODUCTION AND POTENTIAL OF
HYDROCARBON RESOURCES OF THE SUBSOIL OF
BASHKORTOSTAN**

The paper analyzes the state of initial and residual oil and natural gas reserves, presents data on the study of the subsoil of Bashkortostan by prospecting, operational and structural drilling, seismic exploration, as well as the dynamics of oil production over the entire period of formation and development of the oil and gas industry of the Republic. A cautious forecast is made for the near future about the level of oil production.

Keywords: subsurface, oil, natural gas, field, reserves, resources, reservoirs, well, flow rate, drilling, development, depletion, water cut.

Развитие промышленности в Башкортостане тесным образом связано с освоением ее минерально-сырьевых ресурсов. На территории республики открыто более трех тысяч месторождений и проявлений шестидесяти видов минерального сырья. На Государственном балансе числится около 1170 месторождений, на разведанных запасах которых создан минерально-сырьевой комплекс, включающий нефтедобычу и нефтепереработку, черную и цветную металлургию, химическое производство, производство строительных материалов и ряд других отраслей индустрии.

Несмотря на длительные сроки эксплуатации месторождений, недра республики обладают значительным минерально-сырьевым потенциалом, позволяющим обеспечить сохранение достигнутого предприятиями уровня освоения запасов по основным стратегическим видам минерального сырья (нефть, цветные и благородные металлы) на 5–50 лет.

В структуре минерально-сырьевой базы республики важнейшую роль для экономики играют месторождения углеводородного сырья, руд цветных и благородных металлов, сырья для химической промышленности, освоение которых является основой устойчивого экономического развития крупных регионов Башкортостана.

Нефть. Республика Башкортостан относится к старым нефтедобывающим районам России с более чем 85-летней историей станов-

ления и развития нефтяной промышленности. Первые признаки нефти на современной территории республики были обнаружены еще в XVIII веке, а в начале XX века, район Ишимбая был объектом пристального внимания знаменитого «Товарищества Братьев Нобель» и нефтепромышленников из США.

Первое месторождение нефти – Ишимбайское было открыто в 1932 году. За прошедший период в республике открыто более 250 месторождений нефти и газа. Это свидетельствует как о высоком нефтегазовом потенциале, так и о высокой степени изученности недр республики, которая в глубоком бурении составляет в среднем $120,8 \text{ м/км}^2$ (максимальный объем поисково-разведочного бурения пришелся на 1975 г. – 354,8 тыс. м), в структурном бурении – $141,74 \text{ м/км}^2$, в сейсморазведке – $1,22 \text{ км/км}^2$.

Средняя степень разведанности начальных суммарных ресурсов (НСР) нефти Башкортостана 80,4 %, при этом наиболее разведаны нефтегазоносные комплексы палеозойских отложений (нижнекаменноугольный терригенный (93 %), девонский терригенный (85 %) и нижнепермский карбонатный (78,9 %)), наименее – карбонатный верхнедевонско–нижнекаменноугольный комплекс (41,4 %).

Месторождения углеводородного сырья приурочены к восточной окраине Русской платформы (Южно-Татарский свод, Бирская седловина, Благовещенская впадина, Башкирский свод, Верхне-Камская впадина, Мраковская депрессия и др.). Продуктивность палеозойских отложений и структур восточной окраины Русской платформы не равноценна: на Южно-Татарском и Башкирском сводах, в Благовещенской впадине сосредоточено 89,6 млн. т перспективных ресурсов нефти (77 % от всех перспективных ресурсов недр республики). Основное количество перспективных ресурсов нефти сосредоточено в терригенном – 36 % (девонском) и карбонатном – 31 % (верхнедевонском, нижнекаменноугольном) комплексах нефтесодержащих пород. Из всего палеозойского разреза осадочных пород на терригенные коллекторы приходится 58,4 % оцененных перспективных ресурсов нефти и 41,6 % - на карбонатные коллекторы. Около 80 % перспективных ресурсов нефти залегает в продуктивных горизонтах на глубинах от 1000 м до 2000 м, а с горизонтами на глубинах от 2000 м до 3000 м связано около 15 % ресурсов нефти.

На государственном балансе числится 201 месторождение, из них 166 нефтяных, 15 газонефтяных, 7 нефтегазовых и 13 газовых. Начальные суммарные ресурсы нефти составляют 2,4 млрд.т.

В структуре начальных суммарных ресурсов нефти на территории Башкортостана накопленная добыча составляет 1676,4 млн. т – 69,8 %, пик добычи нефти достигнут в 1967 г. – 47,86 млн. т и с этого года (см. рис.) добыча стала неуклонно снижаться. Извлечено более 80 % начальных извлекаемых запасов нефти. Наиболее крупные нефтяные месторождения – Туймазинское, Арланское, Шкаповское, Серафимовское, Сергеевское – вошли в заключительную стадию разработки. Значительная часть фонда скважин на этих месторождениях выведена из эксплуатации. На этой же стадии разработки находится довольно большая по численности группа средних по величине запасов месторождений: Четырманское, Кузбаевское, Игровское, Манчаровское и другие, введенные в разработку в 60-х годах.

Добыча нефти в республике снизилась до 10,9 млн. т в 2008 г. Этот уровень обеспечивался за счет запасов мелких месторождений, разрабатываемых довольно интенсивно. Дебиты скважин снизились до 3,5 т/сутки при довольно высоком отборе жидкости. Обводненность продукции в целом по всем месторождениям превысила 92 %. Вследствие более интенсивной разработки залежей в терригенных высокопродуктивных коллекторах, постоянно возрастает доля запасов в низкопродуктивных карбонатных коллекторах.

Объемы бурения новых скважин ввиду их низкого дебита сократились более чем в 4 раза. Такая динамика является закономерной для старых нефтедобывающих регионов.

Анализируя представленный график можно определенно выделить несколько этапов имеющих вполне правомерное обоснование.

Первый этап (1932-1944 гг.) характеризуется открытием Ишимбайского нефтяного месторождения, изучением его геологического строения и разработка, обоснование методики поисков аналогичных месторождений.

Второй этап (1944-1958 гг. рост добычи нефти в течение многих лет) характеризуется быстрым ростом уровня добычи – до 23 млн. т при относительно небольшом фонде скважин. Такая динамика добычи нефти связана с открытием и вовлечением в разработку девонских залежей на Туймазинском, Серафимовском и Шкаповском месторождениях. Запасы нефти этих месторождений, а также гигантского Арланского месторождения обеспечили рост добычи нефти в течение многих лет. На этом этапе резко увеличился объем буровых работ. Так, проходка разведочных скважин увеличилась до 400 тыс. м. До 500 тыс. м возросла проходка и в эксплуатационном бурении.



Рис. Добыча нефти по Республике Башкортостан

Начало третьего этапа (1958-1967 гг.) определяется вводом в разработку Арланского нефтяного месторождения. В эти годы введены в разработку многие месторождения на севере республики, что позволило увеличить добычу нефти до 47, 87 млн. т.

С 1967 г. начинается четвертый этап. Продолжительность его всего 3 года (1967-1970 гг.). Для этого этапа характерно резкое снижение добычи нефти (на 16 %). Причиной такого падения является снижение добычи нефти на крупнейших нефтяных месторождениях республики – Туймазинском, Шкаповском и Серафимовском.

Пятый этап (1971-1980 гг.). В этот период уровень добычи нефти поддерживался стабильно в объеме 40 млн. т.

На шестом этапе (1980-2000 гг.) добыча нефти неуклонно снижается. Вновь вводимые месторождения мелкие и добыча из них не компенсирует снижения отборов на крупных месторождениях. Для периода последних 5-10 лет характерно снижение объема и низкая эффективность поисково-разведочных работ.

Седьмой этап (2000-2005 гг.) характеризуется стабильно низким уровнем добычи.

Восьмой этап (с 2006 г.) незначительный, но относительно стабильный рост добычи определяется бурением боковых стволов из простаивающих скважин, а также скважин и боковых стволов скважин с

горизонтальным окончанием, а также применение гидроразрыва пластов с целью увеличения дебита и повышения нефтеизвлечения.

При этом вот уже более 50 лет прирост запасов нефти не компенсирует, а только частично восполняет добычу.

Остаточные извлекаемые запасы нефти категорий $A+B+C_1+C_2$ составляют 15,5 %, на неразведанные ресурсы приходится 19,6 %, в том числе на перспективные ресурсы категории C_3 приходится 5,1 %, на прогнозные ресурсы категории D_1 – 14,5 %.

В разработке находится 161 месторождение в которых сосредоточено 99,1 % остаточных извлекаемых запасов (ОИЗ) нефти промышленных категорий (соответственно, в месторождениях, не вовлеченных в разработку, лишь 0,9 %). Хотя основная доля остаточных извлекаемых запасов нефти (75,6 %) приходится на глубины менее 2000 м, их структура характеризуется ухудшением качества. Почти половина ОИЗ приходится на залежи с низкопроницаемыми коллекторами и высоковязкими нефтями, на подгазовые залежи и залежи с осложненными условиями разработки (водонефтяные зоны и участки с малой мощностью), 30,1 % приурочено к карбонатным коллекторам.

Состояние сырьевой базы республики характеризуется значительной выработанностью начальных извлекаемых запасов (степень их использования по разрабатываемым месторождениям составляет 82,7 %) и высокой степенью обводненности добываемой продукции. В месторождениях с обводненностью продукции более 50 % сосредоточено 82,1 % запасов, а около 40 % ОИЗ нефти, приходится на залежи, выработанность которых превышает 80 %. При этом 44 разрабатываемых месторождения, содержащие 57,8 % остаточные извлекаемые запасы нефти, находятся на стадии снижения добычи, еще 30 месторождений (18,0 % ОИЗ) находятся на завершающей стадии разработки. Не вовлеченные в разработку запасы разрабатываемых месторождений (возвратных объектов и отдельных не обустроенных участков) составляют всего лишь 1 % остаточных извлекаемых запасов.

Тем не менее обеспеченность добычи запасами составляет 28 крат и при уменьшении ОИЗ имеет тенденцию к увеличению, что обусловлено снижением темпов отбора и все большим вовлечением в разработку запасов пониженного качества.

Предварительно оцененные запасы нефти категории C_2 составляют всего 1,8 % от начальных суммарных ресурсов нефти республики и также преимущественно (на 96,9 %) относятся к разрабатываемым месторождениям: в основном это не разрабатываемые перифе-

рийные части и водонефтяные зоны (ВНЗ) эксплуатируемых залежей (42,1 %) и возвратные объекты (50,4 %), и только 3,1 % приходится на вовлеченные в разработку месторождения.

Природный газ. В структуре начальных суммарных ресурсов свободного газа (включая и газ газовых шапок) накопленная добыча составляет 5,9 %, текущие запасы категории $A+B+C_1$ – 17,6 %, запасы категории C_2 – 4,9 %. Неразведанные ресурсы свободного газа составляют 71,6 %, в том числе категории C_3 – 2,9 %, категории D_1 – 68,7 %. Степень разведанности начальных суммарных ресурсов газа – 28,4 %.

В тектоническом отношении начальные суммарные ресурсы газа сосредоточены в Мраковской (87,5 %) и Юрюзано-Сылвенской (10,8 %) депрессиях, в незначительном объеме в Башкирском своде и Бымско-Кунгурской впадине. Приурочены они в основном к карбонатным нижнекаменноугольному (79,4 %) и средне-верхнекаменноугольному (10 %) нефтегазоносным комплексам, в то время как наиболее разведанными газоносными комплексами являются: нижнепермский карбонатный (85,7 %), карбонатный средне-верхнекаменноугольный (78,2 %) и карбонатно-терригенный среднего карбона (39,8 %). Большая часть запасов свободного газа (61,0 %) сосредоточена на глубинах 2000–4000 м (карбонатные отложения нижнего и среднего карбона).

Стабильность существующего на данный момент уровня добычи нефти на ближайшую перспективу будет определяться объемом поисково-разведочного бурения, обеспечивающим прирост запасов открываемых месторождений и оперативным вводом их в разработку. А также объемом методов интенсификации добычи нефти и рядом сопутствующих технико-технологических методов и мероприятий, обеспечивающих поддержание объема добычи нефти существующего на данном этапе разработки месторождений.

Библиографический список

1. Антонов К.В. Ресурсный потенциал углеводородного сырья недр Башкортостана / Международная научно-техническая конференция «Повышение качества строительства скважин». Сборник научных трудов. – Уфа: Монография. – 2005. – С. 14–18.
2. Конторович А.Э., Эдер Л.В., Филимонова И.В. Нефтяная промышленность исторически главных центров Волго-Уральской нефтегазоносной провинции, элементы их истории, ближайшие и отдаленные перспективы. Геология и геофизика, 2016, т. 57.– № 12. – С. 2097–2114.

3. Конторович А.Э., Лившиц В.Р. Новые методы оценки, особенности структуры и пути освоения прогнозных ресурсов нефти зрелых нефтегазоносных провинций // Геология и геофизика. 2017. № 12. – С. 1836-1853.

4. Утопленников В.К., Антонов К.В., Крупнов А.Н. Нижнепермский регионально-нефтегазоносный комплекс – потенциальный резерв восполнения запасов нефти Башкортостана / Состояние и перспективы использования геофизических методов для решения актуальных задач поисков, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Материалы Республиканской научно-практической конференции. Октябрьский, 23-27 августа 1999 г. Октябрьский. – 1999. – С. 30-39.

5. Хамитов Р.А., Антонов К.В., Шадрин В.Ф. Геолого-геофизическая изученность недр Башкортостана и перспективы открытия нефтегазовых месторождений / Геология и минерально-сырьевые ресурсы европейской территории России и Урала. Материалы региональной конференции. В двух книгах. Книга первая. – Екатеринбург: Издательство ОАО "Уральская геологосъемочная экспедиция". – 2000. – С. 199–201.

Сведения об авторах

Антонов Константин Васильевич, кандидат технических наук, доцент БашГУ. E-mail: antonov-k-v@mail.ru.

Грабовская Анастасия Петровна, студент 3 курса по специальности ФЗП БашГУ. E-mail: grabovs-43@mail.ru.

Жумабаев Дулат Дауренович, студент 3 курса по специальности ФЗП БашГУ. E-mail: dulat_zxz@mail.ru.

УДК.621.391

Арипов Х.К., Арипова З.Х., Тошматов Ш.Т., Хайруллаев Х.Х.

КОМПЛЕМЕНТАРНЫЙ КАСКОДНЫЙ ИСТОЧНИК ТОКА

В статье рассматривается разработанный комплементарный каскодный источник тока, использующий в качестве источника тока светоизлучающих диодов в инфоркоммуникационных системах передачи информации и электрических осветительных устройств.

Ключевые слова: генератор стабильного тока, светоизлучающий диод, биполяр транзистор, каскод, инжекционно-вольтаический транзистор, комплементарный транзистор.

**Aripov Kh.Kh., Aripova Z.Kh., Toshmatov Sh.T.,
Khayrullayev Kh.Kh.**

COMPLETE CASCODE CURRENT SOURCE

The article discusses the developed complementary cascode current source, used as a current source for light-emitting diodes in information and communication systems for transmitting information and electrical lighting devices.

Key words: stable current generator, light emitting diode, bipolar transistor, cascode, injection-voltaic transistor, complete transistor.

Недостатком каскодных источников токов является небольшой коэффициент полезного действия (КПД) $\eta = [0,5 - (U_{ЭБ}/E)] \cdot 100\%$, где $U_{ЭБ}$ и E – напряжения эмиттер-база транзистора и источника питания. При использовании идентичных транзисторов ($U_{ЭБ1} = U_{ЭБ2} = U_{ЭБ} = 0,6\text{В}$) и $E_n = 10\text{В}$ КПД каскодного источника тока составляет порядка $\eta = 44\%$ [1-3].

Другим недостатком каскодных источников тока является необходимость использования идентичных биполярных транзисторов с малыми токами, что затрудняет их применение в силовых схемах и усложняет технологию изготовления устройства.

Целью работы является создание комплементарного каскодного источника тока (ККИТ), с расширенным диапазоном устойчивой работы в области возникновения электрического пробоя и высокий КПД.

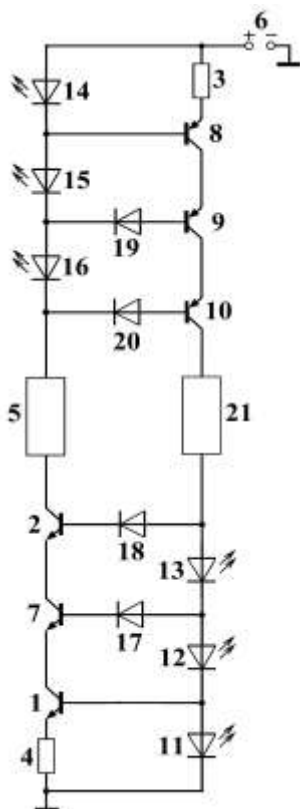


Рис. 1. Электрическая схема ККИТ

На рис.1 – приведена электрическая схема ККИТ. Первый, второй, третий, четвертый, пятый, шестой транзисторы обозначены соответственно: 1,2,7,8,9,10; первый, второй, третий, четвертый диоды обозначены соответственно: 17, 18, 19, 20; первый, второй, третий, четвертый, пятый, шестой светодиоды обозначены соответственно: 11,12,13,14,15,16; первый, второй резисторы обозначены соответственно: 3,4; первая, вторая нагрузка соответственно: 5,21; источник питания: 6.

ККИТ, состоит (рис.1) из электрически соединенных между собой двух биполярных транзисторов п-р-п типа 1,2, двух резисторов

3,4, нагрузки 5 и источника питания 6, отрицательный вывод которого соединен с общей шиной. Один из выводов первого резистора 3 соединен с положительным выводом источника питания 6. Эмиттер первого транзистора 1 соединен с одним из выводов второго резистора 4, второй вывод которого соединен с общей шиной. Коллектор второго транзистора 2 соединен с одним из выводов нагрузки 5. Каскодный источник тока также состоит из одного биполярного транзистора п-р-п типа 7, трех биполярных транзисторов р-п-р типа 8,9,10, шести светодиодов 11,12,13,14,15,16, четырех диодов 17,18,19,20 и второй нагрузкой 21. Анод четвертого светодиода 14 соединен с положительным выводом источника питания 6. Второй вывод первого резистора 3 соединен с эмиттером четвертого транзистора 8. Коллекторы первого, третьего, четвертого, пятого транзисторов 1,7,8,9 соединены с эмиттерами третьего, второго, пятого, шестого транзисторов 7,2,9,10 соответственно. Аноды первого, второго, пятого, шестого светодиодов 11, 12, 15, 16 соединены с катодами второго, третьего, четвертого, пятого светодиодов 12,13,14,15 соответственно. Катод первого светодиода 11 соединен с общей шиной, анод которого соединен с базой первого транзистора 1. Катод четвертого светодиода 14 соединен с базой четвертого транзистора 8. Катод шестого светодиода 16 соединен с вторым выводом нагрузки 5. Коллектор шестого транзистора 10 соединен с первым выводом второй нагрузки 21, второй вывод которой соединен с анодом третьего светодиода 13. Аноды и катоды первого, второго диодов 17,18 соединены с анодами второго, третьего светодиодов 12,13 и базами третьего, второго транзисторов 7,2 соответственно. Базы пятого, шестого транзисторов 9,10 и катоды пятого, шестого светодиодов 15,16 соединены с анодами и катодами третьего, четвертого диодов 19,20 соответственно.

Пример конкретной реализации.

В ККИТ используются источник питания 6 (V1) на напряжение $E_{\Pi}=160$ В, кремниевые три комплементарные транзисторные пары 1,7,2,8,9,10 (Q1, Q2, Q3, Q4, Q5, Q6) марок BD139 и BD140; четыре диода 17, 18, 19, 20 (D1, D2, D3, D4) типа 1N914; два резистора 1,2 (R1, R2) с $R_1=R_2=56$ Ом; шесть светодиодов 11,12,13,14,15,16 (LED1, LED2, LED3, LED4, LED5, LED6) типа MSE340 и две нелинейные нагрузки 5,21 – две по 30 штук последовательно соединенные светодиоды (LED7 ÷ LED36 и LED37 ÷ LED66).

ККИТ работает стабильно в диапазоне изменений напряжения питания E_{Π} от 130 В до 200 В и количества последовательно соеди-

ненных светодиодов $N_{CD}=1\div 30$. При этом нестабильности токов нагрузки (светодиодов) I_{H1} , I_{H2} составляют $\delta_E=0,25\%$ и $\delta_{NCD}=0,06\%$ соответственно, коэффициент полезного действия ККИТ $\eta_{\text{КИТ}}^* = 93,7\%$.

Эффективность по КПД предлагаемого каскодного источника тока при изменении напряжений питания и сопротивления нагрузки (количество последовательно соединенных светодиодов) в указанном диапазоне более чем в два раза превышает КПД наиболее близкого аналога [2].

Разработанные каскодные источники тока позволяют стабилизировать токов нагрузки. При этом источник тока работает в режиме класса А. Когда оба звенья схемы ККИТ совместно участвуют в формировании токов нагрузки, то при этом одновременно ток в двух звеньях схемы ККИТ увеличивается или наоборот.

ККИТ может использоваться в качестве источника тока светоизлучающих диодов в инфоркоммуникационных системах передачи информации и электрических осветительных устройств.

Библиографический список

1. Greeneich, Edwin W. Analog integrated circuits: ISBN 0-412-08521-6, Chapman&Hall, 1997, 341p. pp.55-56
2. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники: ISBN 978-5-9518-0351-1, Пер. с англ. –Изд. 7-е. –М.: Мир, БИНОМ, 2010. -704с. С.82-83
3. Арипов Х.К., Алимова Н.Б., Арипова З.Х., Тошматов Ш.Т. Многозвенные каскодные схемы на составных инжекционно-вольтаических транзисторах // Инженерная физика – Москва, 2020. - № 10. С.49-54.

Сведения об авторах

Арипов Хайрулла Кабилович, доктор физико-математических наук, профессор ТУИТ (Ташкент). E-mail: khayrulla-aripov@yandex.ru.

Арипова Зиёда Хайруллаевна, старший преподаватель, ТУИТ (Ташкент). E-mail: Aripova.ziyoda@mail.ru.

Тошматов Шункоржон Тошпулатович, PhD, докторант, ТУИТ (Ташкент). E-mail: Shu-toshmatov@mail.ru.

Хайруллаев Хабибуллох Хожиакбар угли, слушатель, специализированную школу ИТ имени Мухаммада ал-Хоразмий (Ташкент). E-mail: khayrulla-aripov@yandex.ru.

УДК.621.391

Арипова З.Х., Арипова У.Х., Тошматов Ш.Т.

КАСКОДНЫЙ ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ С УСИЛЕНИЕМ

В статье рассматривается разработанный каскодный фотопреобразователь с усилением, обеспечивающей расширенный диапазон устойчивой работы, высокий коэффициент усиления по току и технологичность изготовления транзистора с использованием однотипных транзисторных структур, выполненных на полупроводниках с одинаковой шириной запрещенной зоны.

Ключевые слова: биполяр транзистор, каскод, инжекционно-вольтаический транзистор, общий эмиттер, составной транзистор.

Aripova Z.Kh., Aripova U.Kh., Toshmatov Sh.T.

CASCODE PHOTOCONVERTER WITH AMPLIFIER

The article discusses the developed cascode photoconverter with amplification, which provides an extended range of stable operation, high current gain and manufacturability of the transistor using the same type of transistor structures made on semiconductors with the same band gap.

Key words: bipolar transistor, cascode, injection-voltaic transistor, common emitter, composite transistor.

Недостатком фотопреобразователей с усилением является низкое быстродействие и ограничения граничной частоты усиления сигнала связанный с проявлением эффекта Миллера, ограниченность диапазона устойчивой работы в области возникновения электрического лавинного пробоя перехода коллектор-база второго биполярного транзистора через прямосмешенные р-п переходы третьего фото диода и первого биполярного транзистора [1-2].

Целью работы является создание каскодный фотопреобразователь с усилением (КФПУ), обеспечивающего расширение диапазона устойчивой работы в области возникновения электрического пробоя, высокую фоточувствительность, быстродействие, граничную частоту и технологичность изготовления диодов, транзисторов и фотодиодов, с использованием полупроводников с одинаковой шириной запрещенной зоны.

п-электрод которого соединен с эмиттером первого транзистора (1), который является общим эмиттером фотопреобразователя. Каскодный фотопреобразователь с усилением также состоит из N биполярных транзисторов ($9, 12, 15, \dots, 9+3(N-2), 9+3(N-1)$) того же типа проводимости, $N+2$ фотодиодов ($6, 7, 10, 13, 16, \dots, 10+3(N-2), 10+3(N-1)$) и $N+1$ диодов ($8, 11, 14, 17, \dots, 11+3(N-2), 11+3(N-1)$), где $N = (U_{пр}/U_{КБ.пр}) - 1$, $U_{пр}$ и $U_{КБ.пр}$ – номинальные пробивные напряжения диодов ($8, 11, 14, 17, \dots, 11+3(N-2), 11+3(N-1)$) и транзисторов ($2, 9, 12, 15, 18, \dots, 9+3(N-2), 9+3(N-1)$) соответственно. п-электрод третьего фотодиода (5) соединен с р-электродом четвертого фотодиода (6), п-электрод которого соединен с р-электродом пятого фотодиода (7), п-электрод которого подсоединен к эмиттеру фотопреобразователя. Коллектор второго транзистора (2) соединен с эмиттером третьего транзистора (9), коллектор которого соединен с эмиттером четвертого транзистора (12), коллектор которого соединен с эмиттером пятого транзистора (15), $\dots$, коллектор $N+1$ транзистора ($9+3(N-2)$) соединен с эмиттером $N+2$ транзистора ($9+3(N-1)$), коллектор которого является общим коллектором фотопреобразователя. р-электрод третьего фотодиода (5) соединен с п-электродом шестого фотодиода (10), р-электрод которого соединен с п-электродом седьмого фотодиода (13), р-электрод которого соединен с п-электродом восьмого фотодиода (16), $\dots$, р-электрод $N+3$ фотодиода ($10+3(N-2)$) соединен с п-электродом $N+4$ фотодиода ($10+3(N-1)$). Третий, четвертый, пятый, шестой, седьмой, восьмой, $\dots$, $N+3$, $N+4$ фотодиоды ($5, 6, 7, 10, 13, 16, \dots, 10+3(N-2), 10+3(N-1)$) освещаются излучением постоянной мощности $P_{п}$, которые являются источниками смещения напряжения базовых цепей второго, третьего, четвертого, пятого, $\dots$, $N+1$, $N+2$ транзисторов ($2, 9, 12, 15, \dots, 9+3(N-2), 9+3(N-1)$). Базы второго, третьего, четвертого, пятого, $\dots$, $N+1$, $N+2$ транзисторов ($2, 9, 12, 15, \dots, 9+3(N-2), 9+3(N-1)$) и р-электроды третьего, шестого, седьмого, восьмого, $\dots$, $N+3$, $N+4$ фотодиодов ($5, 10, 13, 16, \dots, 10+3(N-2), 10+3(N-1)$) соединены с п- и р-электродом первого, второго, третьего, четвертого, $\dots$, N , $N+1$ диодов ($8, 11, 14, 17, \dots, 11+3(N-2), 11+3(N-1)$) соответственно. Транзисторы ($1, 2, 9, 12, 15, \dots, 9+3(N-2), 9+3(N-1)$),

фотодиоды (3,4,5,6,7,10,13,16, ... , $10+3(N-2)$, $10+3(N-1)$) и диоды (8, 11, 14, 17, ..., $11+3(N-2)$, $11+3(N-1)$) выполнены из одинакового полупроводникового материала.

Пример конкретной реализации.

Фотодиоды (3,4,5,6,7,10,13,16, ... , $10+3(N-2)$, $10+3(N-1)$), биполярные транзисторы (1,2,9,12,15, ... , $9+3(N-2)$, $9+3(N-1)$) и диоды (8,11,14,17, ... , $11+3(N-2)$, $11+3(N-1)$) выполнены на основе кремния (фиг.5). Предложено использование биполярных транзисторов п-р-п типа, но при соответствующих изменениях в схеме возможно применение р-п-р биполярных транзисторов.

Для реализации предложенного КФПУ при $N=2$ использованы кремниевые фотодиоды КФД - 7 шт., кремниевые биполярные транзисторы марки BC547C - 4 шт. и кремниевые диоды 1N4007 – 3шт.

Исследованы передаточные, входные и выходные характеристики КФПУ на основе фотодиодов КФД, диодов 1N4007 и биполярных транзисторов марки BC547C. КФПУ при управлении фототоком работает устойчиво при значениях обратного напряжения коллектор-эмиттер в 3-4 раза более высоких, чем у отдельно взятых биполярных транзисторов, а также при рассеиваемой на коллекторе мощности в 3-4 раза превосходящей предельно допустимую для отдельной транзисторной структуры. Дифференциальные h и y параметры КФПУ при заданной рабочей точке: $E_n=100$ В; $R_n=10$ кОм; $I_k=5$ мА; $U_{кз}=50$ В, $U_{бз}=0,651$ В; $I_6=42,4$ мкА; $I_{6\text{ м}}=4$ мкА соответствуют: $h_{113}=663$ Ом; $h_{123}=10^{-6}$ раз; $h_{213}=117$ раз; $h_{223}=0,15$ мСм. и $y_{113}=1,58$ мСм; $y_{123}=1$ нСм; $y_{213}=186$ мСм; $y_{223}=0,16$ мСм. Коэффициенты усиления в указанном режиме для малого сигнала составляют по току $K_i=117$, напряжению $K_u=5458$ и по мощности $K_p=6,45 \cdot 10^5$. Коэффициент нелинейных искажений составляет $K_r=0,008$ %.

КФПУ работает без искажений в диапазоне частот от 0 до 5 МГц. Коэффициент передачи КФПУ по напряжению равен 68 дБ, а фазовый сдвиг сигнала составляет от 180° до 135° .

Предложенный каскодный фотопреобразователь с усилением обеспечивает расширение диапазона устойчивой работы в области возникновения электрического пробоя, высокую фоточувствительность, быстродействие, граничную частоту, в котором транзисторы, фотодиоды и диоды выполнены из одинакового полупроводникового материала может быть использован в качестве гальванически развязывающего элемента в схемах дистанционного управления, в качестве

оптореле, датчика оптических сигналов в телекоммуникационных системах передачи информации и гелиотехнических устройствах.

Библиографический список

1. Арипов Х.К., Алимова Н.Б., Арипова У.Х., Анплеев А.Е., Бустанов Х.Х., Насырходжаев Ф.Р. Фотопреобразователь с усилением // Патент Узбекистан UZ IAP2010 0287. 2016, 27.09.2016, Бюл № 9.
2. Арипова У.Х., Насырходжаев Ф.Р. Исследование каскодного фотопреобразователя с усилением // Электроника, автоматика и измерительная техника, Уфа, 2011. С. 88-91.
3. Арипова У.Х., Закиров Р.Г. Применение фотовольтаического эффекта последовательно-включенных структур в датчиках дыма воздушного судна. Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика, 2019. №10. С.41–44

Сведения об авторах

Арипова Зиёда Хайруллаевна, старший преподаватель, ТУИТ (Ташкент). E-mail: Aripova.ziyoda@mail.ru.

Арипов Умида Хайруллаевна, доцент, доктор философ по технический наук, кафедры “Системы телерадиовещания” ТУИТ (Ташкент). E-mail: aripova.umida@mail.ru.

Тошматов Шункоржон Тошпулатович, PhD, докторант, ТУИТ (Ташкент). E-mail: Shu-toshmatov@mail.ru.

УДК.621.391

Арипова З.Х., Арипов Х.К., Тошматов Ш.Т.

СОСТАВНОЙ КАСКОДНЫЙ ИНЖЕКЦИОННО-ВОЛЬТАИЧЕСКИЙ ТРАНЗИСТОР

В статье рассматривается разработанный составной каскодный инжекционно-вольтаический транзистор, обеспечивающей высокий коэффициент усиления по току и технологичность изготовления транзистора с использованием однотипных транзисторных структур, выполненных на полупроводниках с одинаковой шириной запрещенной зоны.

Ключевые слова: биполяр транзистор, каскод, инжекционно-вольтаический транзистор, общий эмиттер, составной транзистор.

Aripova Z.Kh., Aripov Kh.K., Toshmatov Sh.T.

COMPOSITE CASCODE INJECTION-VOLTAIC TRANSISTOR

The article discusses the developed composite cascode injection-voltaic transistor, which provides a high current gain and manufacturability of the transistor using the same type of transistor structures made on semiconductors with the same band gap.

Key words: bipolar transistor, cascode, injection-voltaic transistor, common emitter, composite transistor.

Известен составной инжекционно-вольтаический транзистор (ИВТ) [1], содержащий электрически соединенные между собой две однотипные биполярные транзисторные структуры, у которых электрод эмиттера первой структуры соединен с электродом коллектора второй структуры, электрод эмиттера которой представляет собой общий эмиттер, а электроды базы первой и второй структур являются общей базой. Транзисторные структуры известного ИВТ выполнены на полупроводниках с разной шириной запрещенных зон, разность между которыми не менее $4AkT$, где A -параметр идеальности вольтамперной характеристики, равной 1 при инжекционном механизме переноса, k -постоянная Больцмана, T - абсолютная температура. Недостатком ИВТ является небольшой коэффициент усиления по току. Другим недостатком ИВТ является также низкая технологичность изготовления транзистора из-за использования полупроводниковых структур с различной шириной запрещенных зон.

Наиболее близким к предлагаемому составному каскодному инжекционно-вольтаическому транзистору является трехструктурный составной инжекционно-вольтаический транзистор (ТИВТ) [2]. Составной ТИВТ содержит электрически соединенные между собой три однотипные биполярные транзисторные структуры, у которых электрод эмиттера первой структуры соединен с электродом базы второй структуры, электрод эмиттера которой представляет собой общий эмиттер, а электрод базы первой структуры является общей базой, электрод эмиттера третьей структуры соединен с электродом коллектора второй структуры, а электрод базы соединен с электродами коллектора и базы первой транзисторной структуры, при этом электрод коллектора третьей структуры является общим коллектором инжекционно-вольтаического транзистора. Недостатком ТИВТ транзистора является низкий коэффициент усиления по току.

Целью исследования является создание составного каскодного инжекционно-вольтаического транзистора (КИВТ), обеспечивающего высокий коэффициент усиления по току и технологичности изготовления транзистора с использованием однотипных транзисторных структур, выполненных на полупроводниках с одинаковой шириной запрещенной зоны.

Составной КИВТ содержит электрически соединенные между собой семь однотипных биполярных транзисторных структур на одинаковом полупроводниковом материале (см.рис.1).

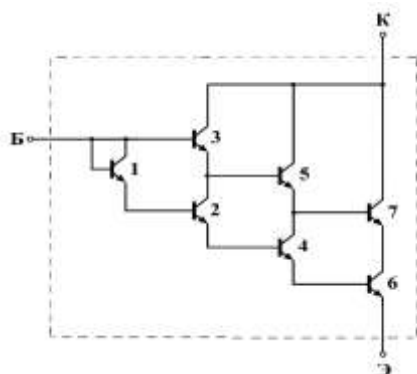


Рис.1. Электрическая схема составного КИВТ

Электрод эмиттера первой структуры 1 соединен с электродом базы второй структуры 2. Коллекторный электрод второй структуры 2 соединен с эмиттерным электродом третьей структуры 3, электрод базы которой соединен с электродами коллектора и базы первой транзисторной структуры 1. Электроды баз четвертой, пятой, шестой и седьмой структур 4,5,6,7 подсоединены к эмиттерам второй, третьей, четвертой и пятой структур 2,3,4,5 соответственно. Электроды коллекторов четвертой и шестой структур 4,6 подсоединены к эмиттерам пятой и седьмой структур 5,7 соответственно. Электроды коллекторов пятой и седьмой структур 5,7 подсоединены к коллектору третьей структуры 3. После электрического соединения эмиттерный электрод шестой 6, коллекторный электрод третьей 3 и базовый электрод первой 1 структур являются соответственно эмиттерным Э, коллекторным К и базовым Б электродами составного КИВТ.

Использование семьи однотипных структур на одинаковом полупроводнике улучшает технологичность изготовления составного КИВТ из-за исключения использования полупроводниковых структур на материалах с различными ширинами запрещенных зон.

Для выполнения предлагаемого составного КИВТ были использованы семь промышленно выпускаемых однотипных транзисторных структур $p-n-p$ типа BD139 на одинаковом полупроводнике. Результаты испытания составного КИВТ на основе биполярного транзистора $p-n-p$ -типа BD139 приведены на рис.2-4.

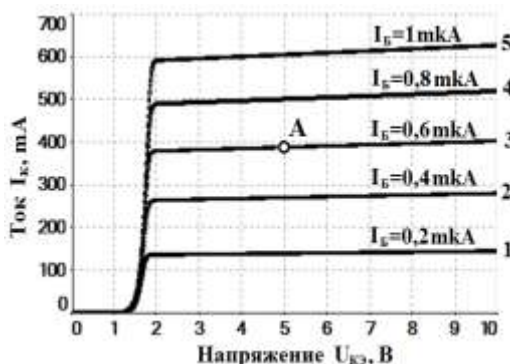


Рис.2. Выходные статические характеристики составного КИВТ на основе транзисторов BD139 при заданном и постоянном значении I_B

Составной КИВТ при управлении напряжением база-эмиттер работает устойчиво при значениях обратного напряжения коллектор-база в 2-3 раза более высоких, чем отдельно взятые транзисторные структуры и при рассеиваемой на коллекторе мощности, в 2-3 раза превосходящей предельно допустимую для отдельной транзисторной структуры и транзисторов Дарлингтона. Дифференциальные H и Y параметры составного КИВТ в заданной рабочей точке А и А' (рис.2,3 и 4) при $U_{KЭ}=5$ В, $U_{БЭ}=2,2011$ В, $I_K=389$ мА и $I_B=0,6$ мкА соответствуют: $H_{11Э}=182$ кОм, $H_{12Э}=0,86 \cdot 10^{-3}$, $H_{21Э}=5,8 \cdot 10^5$, $H_{22Э}=2,91$ мкСм и $Y_{11Э}=5,5$ мкСм; $Y_{12Э}=-4,8$ нСм; $Y_{21Э}=3,02$ См; $Y_{22Э}=38$ мкСм. Коэффициенты усиления в указанном режиме для малого сигнала составляют по току $K_i=5,8 \cdot 10^5$, напряжению $K_u=0,8 \cdot 10^5$ и мощности $K_p=46,4 \cdot 10^9$ [3].

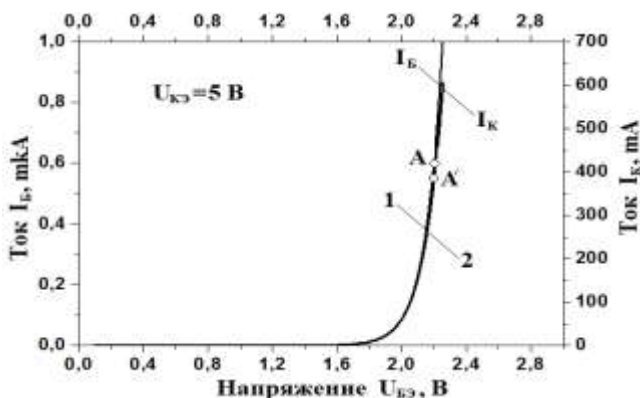


Рис.3. Входные (1) и проходные (2) статические характеристики составного КИВТ

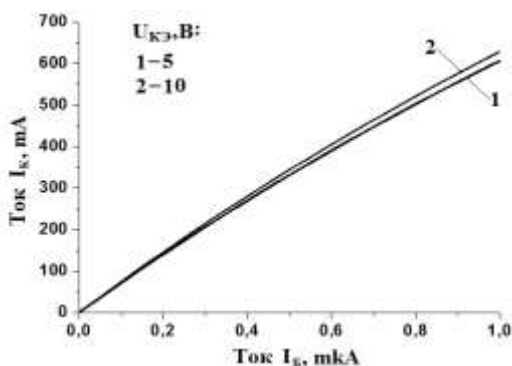


Рис.4. Передаточные характеристики составного КИВТ в схеме с общим эмиттером

Предлагаемый составной каскодный инжекционно-вольтаический транзистор может быть использован в предварительных и выходных каскадах усилителей низкой частоты, управляющих схемах радиоприемных и радиопередающих устройств, электронном оборудовании, промышленной и автомобильной электронике, а также при создании информационных, телекоммуникационных устройств в качестве элементной базы.

Библиографический список

1. Арипова З.Х., Тошматов Ш.Т. Каскодный инжекционно-вольтаический транзистор // Физика полупроводников и микроэлектроника. – Т.1, №2. – 2019. – С. 36–40. DOI: 10.37681/2181-9947-2019-2.
2. Арипов Х.К., Алимова Н.Б., Арипова З.Х., Тошматов Ш.Т. Многозвенные каскодные схемы на составных инжекционно-вольтаических транзисторах // Инженерная физика. 2020. №10. С.49–54. DOI: 10.2591/infizik.10.2020.1169.
3. Арипова З.Х. Составной каскодный инжекционно-вольтаический транзистор. Патент Узбекистана UZ IAP 06482, 31.05. 2021, Бюллетень № 5(241), С. 58–59.

Сведения об авторах

Арипова Зиёда Хайруллаевна, старший преподаватель, ТУИТ (Ташкент). E-mail: Aripova.ziyoda@mail.ru.

Арипов Хайрулла Кабилович, доктор физико-математических наук, профессор ТУИТ (Ташкент). E-mail: khayrulla-aripov@yandex.ru.

Тошматов Шункоржон Тошпулатович, PhD, докторант, ТУИТ (Ташкент). E-mail: Shu-toshmatov@mail.ru.

УДК 612.843.721

Гаврилов И.А., Мухамедова Д.Б., Носиров Х.Х.

КОНТУРНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРНЫХ ТОЧЕК СТЕРЕОПАРЫ НА ОСНОВЕ БИНАРНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

В статье рассматривается метод определения параллаксных сдвигов парных точек стереопар на основе их бинарных изображений. Данный метод позволяет использовать более простые и дешевые микропроцессоры для формирования карт глубины в стереотелевизионных системах реального времени.

Ключевые слова: цифровое телевидение, стереоскопическое телевидение, параллакс, стереопара, выделение контуров, бинарные изображения.

Gavrilov I.A., Mukhamedova D.B., Nosirov. Kh.Kh.

CONTOUR METHOD FOR DETERMINING OF PAIRED POINTS OF A STEREOPAIR BASED ON BINARY IMAGES

The method for determining of parallax shifts of paired points of stereopairs based on their binary images is discussed in the article. This method allows using simpler and cheaper microprocessors to generate depth maps in real-time stereo television systems.

Keywords: digital television, stereoscopic television, parallax, stereo pair, contour detection, binary images.

Для обеспечения высокой реалистичности изображений трехмерного мира на экране стереодисплея требуется многоракурсная съемка с большим количеством камер. Однако, при многоракурсной съемке возникает проблема хранения большого количества видеоданных от видеопотоков с каждой камеры. Несмотря на то, что современные методы цифровой видеокомпрессии позволяют эффективно уменьшать объемы видеоданных, объем данных при многоракурсной видеосъемке возрастет многократно. Поэтому для эффективного уменьшения больших объемов видеоданных и совместимости систем обычного и объемного телевидения был разработан специальный формат, называемый **2D+Z** [1]. В этом формате любому обычному плоскому (2D) изображению добавляется информация об удаленности от камеры каждого пикселя (Z-координата). Такое представление изображения называют "формат 2D+Z", а плоскость координат Z – "картой глубины".

Карта глубины – это черно-белое изображение, которое по размеру совпадает с исходным изображением и передает уровнями яркости (градациями серого цвета) информацию о глубинном расположении объектов сцены. Так на рис. 1 показан пример исходного изображения и его карты глубины [1]. На таком изображении более светлые области характеризуют близость объектов к камере, а более темные – их удаленность.

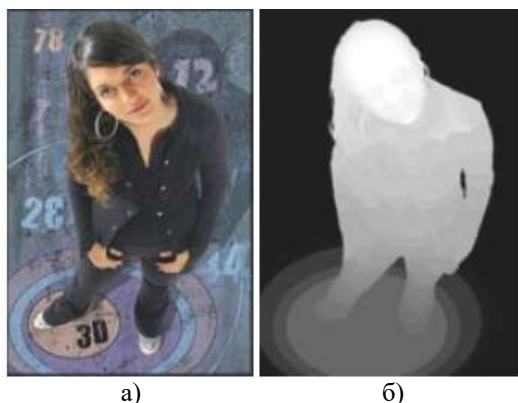


Рис. 1. Исходное изображение (а) и его карта глубины (б)

В общем случае, для построения карты глубины по стереопаре, необходимо для каждой точки левого кадра стереопары выполнить поиск парной ей точки на кадре правой стереопары. Затем по паре соответствующих точек можно определить координаты их прообраза в трехмерном пространстве и вычислить расстояния от объектов сцены до плоскости телевизионной камеры. Для этой цели обычно используется нахождение параллакса смещения тождественных точек видеообъектов в кадрах стереопары [2, 3]. При этом связь сдвига отображения объекта от центра изображения a_1 , фокусного расстояния объектива f и отклонения объекта от оптической оси α_1 отображается следующим выражением:

$$f = \frac{a_1}{\sin \alpha_1} = \frac{H}{\sin(\Theta/2)} \quad (1)$$

где H – ширина изображения, а θ – угол обзора камер. Соответственно, значение глубины Z обратно пропорционально величине смещения пикселей и может быть вычислено следующим способом [3]:

$$Z = \frac{fb_0}{d} \quad (2)$$

где, f – фокусное расстояние объективов камер, b_0 – базис (расстояние между объективами), d – смещение объекта в стереопаре (диспарантность).

Таким образом, сам по себе механизм вычисления глубины довольно прост, однако нахождение парных точек в реальных телевизи-

онных изображениях стереопары является довольно сложной задачей, основанной на использовании методов выделения контуров и распознавании объектов сцены [4]. Причем даже на сегодняшний день еще не создан универсальный алгоритм решения проблемы соответствия, способный строить карту глубины приемлемого качества по произвольной стереопаре. Это связано с тем, что используемые методы выделения контуров на основе операторов Собеля, Кани и др. плохо работают на малоконтрастных изображениях, что создает разрывы контурных линий. К тому же данные алгоритмы сегментации имеют довольно низкое быстродействие.

С другой стороны, проведенные ранее автором эксперименты, показали, что качественное выделение контуров с высоким быстродействием легко получить на бинарных (черно-белых) изображениях. Для этого достаточно провести операцию «исключающего или» между исходным бинарным изображением и его диагонально сдвинутой на 1 пиксель копией. В результате на черном фоне получается белая неразрывная контурная линия шириной в 1 пиксель [5]. Однако проблема заключается в том, что при преобразовании полутоновых изображений в двух градационные теряется большая часть полезной информации, что приводит к искажениям формы видеообъектов или даже их потере. Поэтому был предложен метод выделения контуров в бинарных изображениях по битовым плоскостям их пиксельных значений. А, учитывая то, глаз плохо замечает небольшие изменения глубинного расположения предметов, то младшими разрядами пикселей можно пренебречь. Обработка изображений предложенным методом, в общем случае, включает следующие основные этапы:

- преобразование цветных изображений в яркостные (Y) изображения;
- разделение яркостных значений пикселей на битовые плоскости бинарных изображений;
- выделение контуров в бинарных изображениях;
- анализ связности контуров в битовых плоскостях;
- вычисление относительного смещения парных точек контуров стереопары.

Таким образом, в памяти формируется 6-7 контурных изображений битовых плоскостей для каждого кадра стереопары, по которым можно определить их относительные смещения. Так для примера, на рис. 2 показаны исходные кадры стереопары (а), их яркостные изображения (б), соответствующие изображения 7-ой битовой плоскости

пиксельных значений (старшего разряда) (в) и результат их оконтуривания (г).

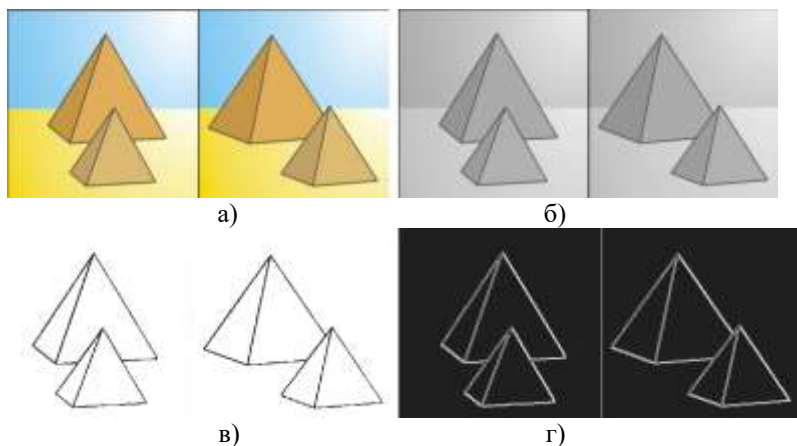


Рис.2. Этапы обработки изображений стереопары предложенным методом, где: а) исходные изображения стереопары, б) их яркостные изображения, в) отображение пиксельных значений 7-ой битовой плоскости, и соответствующие им контурные изображения (г)

Как видно из демонстрационного рисунка 2, на контрастных изображениях достаточно использовать всего нескольких старших разрядов для надежного нахождения контуров видеообъектов и определения их параллаксных сдвигов. Однако на реальных мелкоструктурных изображениях возникает очень большое количество различных контуров, сильно затрудняющих отнесение их принадлежности к одному объекту. Так на рис. 3 представлены изображение паровоза (а) и соответствующие изображения 7-ой, 6-ой и 5-ой битовой плоскости его пиксельных значений.

Как видно из рисунка, чем меньше номер битовой плоскости, тем хаотичнее становится ее изображение. Поэтому для повышения быстродействия их обработки следует применить низкочастотную фильтрацию, как яркостного изображения, так и бинарных битовых плоскостей. Причем для бинарных изображений хорошо подходит рекуррентный фильтр с размером апертуры 3×3 или 5×5 пикселей [6]. Данные фильтры хорошо подавляют шумы и мелкоструктурные элементы, глубинное расположение которых глаз не замечает.



а) б) в) г)

Рис. 3. Изображение паровоза (а) и изображения 7-ой (б), 6-ой (в) и 5-ой (г) битовых плоскостей их пиксельных значений

Таким образом, для повышения быстродействия нахождения параллаксных смещений парных точек стереопары был предложен метод выделения контуров видеообъектов по бинарным изображениям битовых плоскостей их пикселей. Данный метод обладает высоким быстродействием и позволяет формировать неразрывные контуры объектов в реальном времени на относительно недорогой микропроцессорной технике.

Библиографический список

1. Поляков А.Ю. Цифровое объемное телевидение 3DTV. 2009 г. <http://protv.ua/news/tv/74830/>
2. Основы стереозрения. <https://habr.com/ru/post/130300/>
3. Довбня Д. В., асс. Козаченко А. А. Основы стереозрения. Построение карты глубины. http://www.rusnauka.com/15_NNM_2012/Informatica/3_110924.doc.htm.
4. А. Т. Вахитов, Л. С. Гуревич, Д. В. Павленко Обзор алгоритмов стереозрения. <https://www.math.spbu.ru/user/gran/soi4/pavlenko.pdf>.
5. Гаврилов И.А. Метод выделения контуров объектов в двухградационных изображениях для системы технического зрения на базе микро-ЭВМ. Тезисы доклада республиканской научно-технической конференции. «Республиканинг алока тармоги тизимларини ракамлаштириш». Министерство связи УзССР, УзНПО «Кибернетика» Ташкент 1994 г. Б.112.

Сведения об авторах

Гаврилов Игорь Александрович, кандидат технических наук, доцент Ташкентского университета информационных технологий (ТУИТ). E-mail: gavrilov-1960@mail.ru.

Мухамедова Диёрабегим Бахтиёр кизи, аспирант ТУИТ. E-mail: diyorabegim13@mail.ru.

Носиров Хабибулло Хикматулло углы, кандидат технических наук, доцент ТУИТ. E-mail: n.khabibullo1990@gmail.com.

УДК 612.843.721

Гаврилов И.А., Мухамедова Д.Б., Ахмедова А.Х.

КОНТУРНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ ВИДЕООБЪЕКТОВ ПО ИХ БИНАРНЫМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ

В статье рассматривается метод межкадрового кодирования ТВ изображений, основанный на выделении контуров видеообъектов по их бинарным изображениям битовых плоскостей пиксельных значений. Данный метод оценки движения позволяет более эффективно кодировать сюжеты с большой скоростью движения объектов в реальном времени.

Ключевые слова: цифровое телевидение, компенсация движения, межкадровое кодирование, видеопоток, видео компрессия, видео кодер.

Gavrilov I.A., Mukhamedova D.B., Akhmedova A.Kh.

CONTOUR METHOD FOR THE MOTION DETERMINING OF VIDEO OBJECTS BY THEIR BINARY IMAGES

The method of interframe coding of TV images, that based on the contours selection of video objects by their binary images of bit planes of pixel values is discussed in the article. This method of motion estimation allows more efficiently encode scenes with a high speed of objects movement in real time.

Keywords: digital television, motion compensation, interframe coding, video stream, video compression, video encoder.

В настоящее время для компрессии видеопотоков в цифровом вещательном и прикладном телевидении широкое распространение получили видеокодеки HviD, H.264 и его улучшенная модификация H.265. Данные кодеки в среднем могут обеспечить хорошее качество изображений при скоростях цифрового потока (битрейтах) 1000-2500 Мбит/с в зависимости от типа кодека. Это связано с тем, что обычно

информация в соседних кадрах одного видеосюжета меняется слабо. Поэтому, если передавать видеоинформацию о межкадровых различиях видеосюжета относительно опорных кадров, то можно получить довольно высокие значения компрессии видеопотока. А поскольку в телевизионных кадрах происходит какое-то перемещение объектов съемки или изменение панорамы, то для повышения эффективности компрессии применяются специальные методы компенсации движения видеообъектов в соседних кадрах. Применение компенсации движения существенно минимизирует межкадровые различия и, тем самым, обеспечивает основное сжатие видеопотока. Но проблема заключается в том, что в телевизионных кадрах обычно присутствуют разные типы движения видеообъектов: локальное, глобальное, комбинированное, изменение масштаба при приближении или удалении объектов, а также наезд или отъезд (оптический зум) [1]. Кроме того, для видеокомпрессии очень важное значение имеет скорость перемещения видеообъектов, так как время кодирования кадра не должно превышать 40 мс, иначе движение пойдет рывками [2]. Соответственно, для снижения времени кодирования, на практике часто в видеокадрах обрабатываются только локальное и глобальное движения [1].

Для этой цели существует ряд различных методов блочной компенсации движения, многие из которых представляют собой сложный итерационный процесс, требующий больших затрат времени [3]. Поэтому для повышения быстродействия кодера обычно поиск движения производится в относительно небольшой зоне, редко превышающей ± 16 пикселей. Однако, при больших скоростях перемещения видеообъектов их блоки могут выйти из зоны поиска и, эффективность компрессии кадра падает, что ухудшает качество изображений кодированных с постоянным битрейтом. Так на рис.1 показаны 2 смежных кадра видеосюжета и результат их компенсации движения, где цветными блоками показаны межкадровые различия, которые, из-за сильного смещения объектов скомпенсировать не удалось. Соответственно, цветные блоки видеоданных будут кодированы по алгоритму внутрикадрового кодирования, что снижает общую эффективность сжатия видеопотока.



Рис.1. Смежные кадры видеосюжета (а) и результат их компенсации движения (б)

Также известно, что большей эффективностью в компенсации движения обладают методы на основе выделения контуров видеообъектов, однако они отличаются большой вычислительной сложностью и плохо работают на малоконтрастных изображениях [3].

Проведенные ранее исследования показали, что неразрывные контурные линии объектов очень просто получаются на двухградационных (бинарных) изображениях. Для этого достаточно провести операцию «исключающего или» между бинарным изображением и его диагонально сдвинутой на 1 пиксель копией. В результате на черном фоне получается белая неразрывная контурная линия шириной в 1 пиксель [4]. Но при преобразовании полноцветного или яркостного изображения в бинарное обычно теряется большая часть полезной информации, что приводит к искажениям формы видеообъектов или даже их потерям. Поэтому был предложен метод, использующий значения битовых плоскостей яркостного сигнала в качестве бинарных изображений, так как они сами по себе уже являются бинарными, как показано на рис. 2.

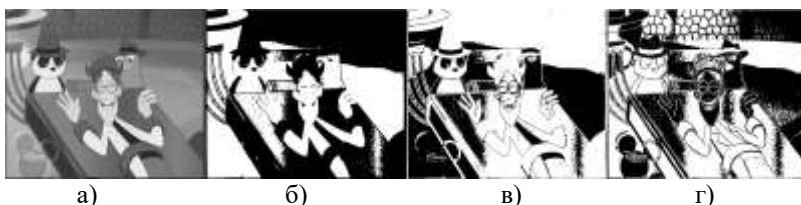


Рис. 2. Пример яркостного изображения (а) и составляющие его 7-ая (б), 6-ая (в) и 5-ая (г) битовая плоскость

Для уменьшения влияния шумов и точечных объектов на время анализа контуров видеообъектов, яркостное изображение следует пропустить через сглаживающий низкочастотный фильтр, результат работы которого показан на рис. 3.



Рис. 3. Вид яркостного изображения и его составляющие 7-ой, 6-ой и 5-ой битовых плоскостей после применения сглаживающего фильтра

Фильтрация изображений битовых плоскостей перед выделением контуров также нужна для устранения очертаний мелкоструктурных элементов. Для этой цели хорошо подходит рекуррентный фильтр с размером апертуры 3×3 или 5×5 пикселей. В данном фильтре в процессе фильтрации используются не только элементы исходного, но и уже отфильтрованного изображения, что повышает его эффективность.

В процессе работы фильтра яркость центрального элемента блока изображения размером 3×3 пикселя определяется суммой яркостей его элементов. Если сумма больше пороговой величины равной 5, то его яркость устанавливается в "1", если нет, то в "0". После чего блок сдвигается вправо на один элемент по строке, и операция повторяется, до конца строки. Затем такая же операция проводится для следующих строк кадра, пока не будет пройден весь растр. После этого производится операция выделения контуров, как показано на рис. 4.



Рис. 4. Результат выделения контуров бинарных изображений в 7-ой, 6-ой и 5-ой битовых плоскостях, соответственно

Соответственно, для оценки движения видеообъектов в смежных кадрах такая операция производится как для текущего кадра видеопотока, так и для следующего. При этом производится анализ принадлежности контуров разных битовых плоскостей одному объекту.

Для упрощения идентификации контуров объектов в разных кадрах все контуры нумеруются и определяются такие параметры, как их координаты, периметр (P), площадь (S), центр тяжести (M). Также можно использовать коэффициент формы $K_{\Phi}=S/P$ [5]. В результате этого достаточно просто определить координаты контуров парных видеообъектов и их смещение, которое и используется для первичного целеуказания при компенсации движения.

Сама компенсация движения может выполняться различными способами, например, блоками переменного размера, позиции которых корректируются по минимальному значению суммы абсолютных разностей пиксельных значений этих блоков [3]. При этом снимается ограничение с размеров зоны поиска предполагаемого смещения видеообъектов, так как контурный метод позволяет определять смещение по всему кадру.

В заключение следует отметить, что для повышения быстродействия межкадрового кодирования видеоданных на основе компенсации движения видеообъектов и оценки их быстрого движения был предложен метод выделения контуров видеообъектов по их бинарным изображениям битовых плоскостей пикселей. Данный метод существенно упрощает процесс нахождения координат двигающихся объектов в кадрах и снимает ограничение на зону поиска их предполагаемого смещения. Такой подход, с одной стороны, позволяет повысить эффективность компрессии видеопотока в реальном времени на сюжетах с быстрым движением в кадрах, а с другой стороны, использовать в кодерах относительно недорогую микропроцессорную технику.

В статье подробно не рассматриваются процессы обработки выделенных контуров и их компенсацию движения, поскольку данные механизмы находятся в разработке и являются предметом дальнейших исследований.

Библиографический список

1. Мухамедова Д.Б., Гаврилов И.А. Сравнительная оценка межкадровой обработки видеопотоков в видеокодеках вещательного телевидения. Статья в сборнике докладов Республиканской научно-технической конференции «Роль информационно-коммуникационных

технологий в инновационном развитии отраслей экономики». Ташкент. 5-6 марта 2020 г. С. 330-333.

2. Гаврилов И.А., Пузий А.Н., Рахимов Т.Г. Оценка влияния подвижности видеообъектов на качество изображений в кодеках стандарта H.264, H.265. Тезисы доклада в материалах XXIII международной научно-технической конференции «Современные средства связи», проходившей 18–19 октября 2018 года в городе Минск, Республика Беларусь. С. 60-62.

3. Денис Кубасов, Дмитрий Ватолин «Обзор методов компенсации движения», http://cgm.graphicon.ru/content/view/6/64/#_Тoc104359666.

4. Гаврилов И.А. Метод выделения контуров объектов в двухградационных изображениях для системы технического зрения на базе микро-ЭВМ. Тезисы доклада республиканской научно-технической конференции. «Республиканинг алоқа тармоғи тизимларини рақамлаштириш». Министерство связи УзССР, УзНПО «Кибернетика» Ташкент 1994 г. Б.112.

5. Гарелик С.А, Кац Б.М, Киврин В.И. Телевизионные измерительные системы. М.: Связь, 1980.

Сведения об авторах

Гаврилов Игорь Александрович, кандидат технических наук, доцент Ташкентского университета информационных технологий (ТУИТ). E-mail: gavrilov-1960@mail.ru.

Мухамедова Диёрабегим Бахтиёр кизи, аспирант ТУИТ. E-mail: diyorabegim13@mail.ru.

Ахмедова Анора Халбаевна, старший преподаватель ТУИТ.

УДК 616.28-76+534.773.2

Галиев А.Л., Орлов А.В., Юмагулов Н.И.

СИСТЕМА ДЛЯ ЭЛЕКТРОАКУПНКТУРЫ ИМПУЛЬСНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

В работе описывается, разработанный авторами прибор для электроакупунктуры импульсного воздействия с использованием современных элементов цифровой логики.

Ключевые слова: Электроакупунктура, генератор заданной мощности, цифроаналоговый преобразователь, затухающие колебания.

Galiev A.L., Orlov A.V., Yumagulov N.I.

PULSE EXPOSURE ELECTRIC ACUPUNCTURE SYSTEM

The paper describes a device developed by the authors for impulse exposure electroacupuncture using modern elements of digital logic.

Keywords: Electroacupuncture, generator of a given power, digital-to-analog converter, damped oscillations.

В современной действительности среди решаемых задач большое внимание уделяется развитию средств измерений, диагностики и лечебного воздействия на организм человека как объекта исследования (ОИ). На сегодняшний день наиболее быстрым и удобным экспресс методом функциональной оценки состояния пациента является электропунктура [1-6].

Электропунктура - воздействие на биологически активные точки определенными токами низкой частоты, которые оказывают выраженное тормозящее, обезболивающее, гипосенсибилизирующее, антиангинальное действие. В лаборатории кафедры Общей и теоретической физики разработали прибор для электроакупунктуры импульсного воздействия, структурная схема которого приведена на рисунке 1. Для обеспечения стабильного значения тока воздействия используются генераторы заданной мощности, вырабатывающий «пачку» импульсов с частотой следования 10-12 Гц. Частота затухающих колебаний синусоидальной формы в каждой «пачке» выбирается в пределах 1-2 кГц. Такой подход в деле построения прибора электропунктуры исключает появления раздражающих пациента скачков тока при обнаружении биологически активной точки (БАТ).

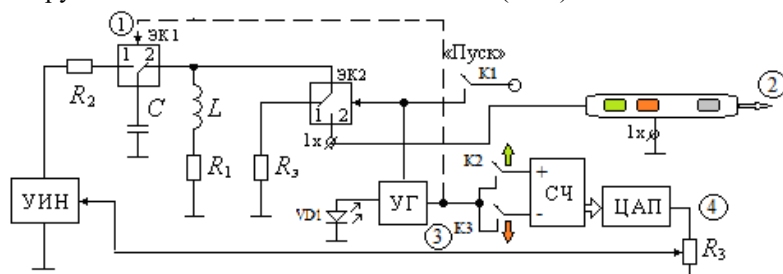


Рис.1. Структурная схема прибора для электроакупунктуры, действующая на объект исследования энергией заряженного конденсатора

Рассматриваемый в работе устройство для электроакупунктуры использует формирователь затухающих колебаний (ФЗК), позволяющий поддерживать постоянство энергии воздействия на БАТ независимо от значения сопротивления кожи.

На рис. 1 приведена функциональная схема прибора для электроакупунктуры, воздействующая на объект исследования энергией заряженного конденсатора, по сути являющийся измерительным генератором, учитывающим нелинейность и температурную зависимость исследуемых объектов на вносимое возмущение. Отметим, что ФЗК представляет собой устройство, работающее в режиме импульсной генерации, в котором постоянство мощности достигается воздействием на объект исследования постоянной энергией «пачки» импульсов, заполненных затухающими гармоническими колебаниями.

В состав устройства входят: УИН – управляемый источник напряжения; ЭК1 – электронный ключ управления процессами заряда и разряда конденсатора С; ЭК2 – электронный ключ, позволяющий выбирать режим коррекции мощности сигнала или режим воздействия на объект исследования; СЧ – счетчик числа циклов коррекции мощности импульсной последовательности; ЦАП – цифроаналоговый преобразователь, управляющий УИН; УГ – управляющий генератор;

Временные диаграммы, поясняющие принцип работы системы электроакупунктуры, приведены на рис. 2, номера эпюр которого соответствуют цифровым обозначениям контрольных точек, указанных на рис. 1.

Длительность импульсов управляющего генератора УГ, определяется временем заряда конденсатора C_1 (позиция 1):

$$t_z = (3 \div 4) \tau_{зар},$$

При формировании заднего фронта управляющего импульса электронный ключ ЭК1 коммутирует конденсатор в цепь, содержащую катушку индуктивности, образуя параллельный колебательный контур, который формирует затухающие квазигармонические колебания (позиция 2). Напряжение, снимаемое с контура, образует сигнал воздействия, который в режиме коррекции (пассивный режим) подается на эталонное сопротивление $R_э$.

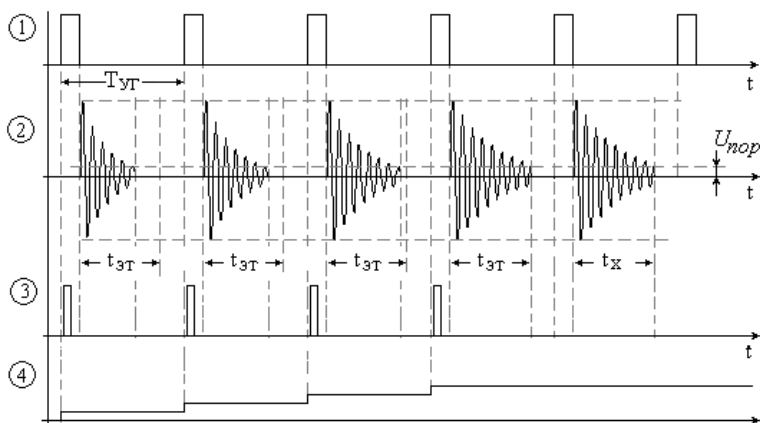


Рис. 2. Временные диаграммы, поясняющие работу системы электроакупунктуры

При нажатии на ключ К1 система подключается к источнику питания прибора (на схеме источник питания не указан), электронный ключ ЭК2 соединяет центральный щуп прибора (позиция 2 на рис.1) к колебательному контуру (LC) и разрешает работу УГ. Индикатором рабочего состояния прибора служит светодиод VD1. В схеме прибора предусмотрена возможность индикации факта обнаружения БАТ по признаку изменения тока через сопротивление R_1 в цепи индуктивности колебательного контура. Узел индикации на схеме не приведен, т.к. имеет множество вариантов решения схемного построения.

Управление мощностью затухающих колебаний осуществляется путем нажатия кнопок К2«Вверх» или К3«Вниз»

Воздействие на объект исследования осуществляется энергией, изменение которой относительно величины накопленной на конденсаторе энергии W представлено на рис. 3, а.

Нелинейный характер изменения энергии, вводимой в объект исследования, объясняется увеличением потерь на активном сопротивлении контура R_n .

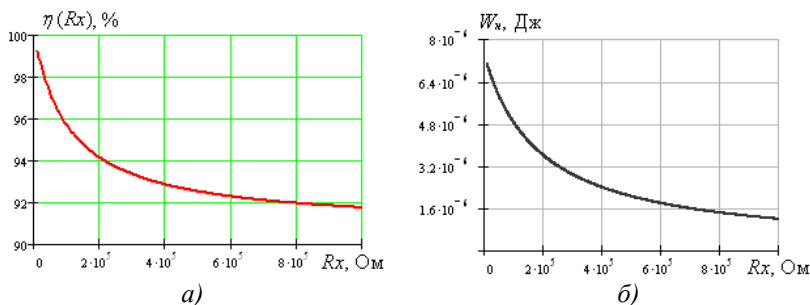


Рис. 3. Зависимость рассеиваемой энергии от сопротивления кожного покрова

Помимо потерь на активном сопротивлении контура потребление энергии осуществляется в течение всего времени работы устройства. Поэтому прибора электроакупунктуры, работающего от автономного источника питания, практический интерес представляет оценка экономичности и КПД устройства. Не рассматривая вопросы управления отдельных функциональных узлов прибора, которые определяют ряд основных параметров, таких как ток потребления, скорость нарастания сигнала воздействия и т.д., потребление энергии во многом связано с процессом заряда конденсатора C (рис. 1) и формированием затухающего колебания в колебательном контуре.

В процессе заряда скорость нарастания напряжения на обкладках конденсатора определяется значением сопротивления R_2 , минимальное значение которого определяется предельным значением тока электронного ключа ЭК1 (рис 1).

Изменение напряжения питания E_0 за счет увеличения тока заряда приводит к увеличению потерь контура, зависимость которой представлена на рис. 5. Однако за счет увеличения накопленной на конденсаторе энергии:

$$W = \frac{CE_0^2}{2}$$

коэффициент полезного действия в течение заряда конденсатора остается постоянным, величина которого при сопротивлении $R_2=220$ Ом не превышает 50,1 %.

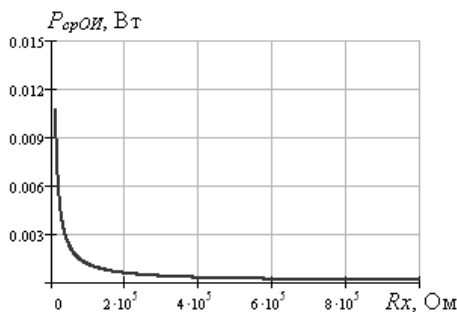


Рис. 4. Изменение рассеиваемой в ОИ средней мощности пачки импульса от сопротивления кожного покрова

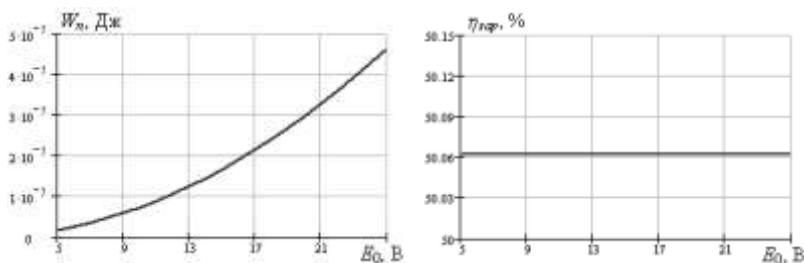


Рис. 5. Зависимость изменения потерь энергии и КПД заряда конденсатора при изменении напряжения $U_{ИИ}$

В заключение отметим, что разработанная система электроakupунктуры с формирователем затухающих колебаний постоянной энергии и мощности может работать как автономный генератор заданной мощности и энергии, обладающий высокими метрологическими характеристиками.

Библиографический список

1. Крамер Ф. Учебник по электроakupунктуре. – М.: Имедис, 1995. – 235 с.
2. Самохин А.В., Готовский Ю.В. Электроakupунктурная диагностика и терапия по методу Р. Фолля. – М.: Имедис, 1995. – 250 с.
3. Шimmel X.В. Фотон-резонансный тест – инновационное дополнение ЭАП. (Материалы 8-й международной конференции «Теоретические и клинические аспекты применения биорезонансной и мультирезонансной терапии». – М.: Имедис, 2002.

4. Самохин А.В., Готовский Ю.В. Электростимуляционная диагностика и терапия по методу Р.Фолля. 6-е изд., испр. – М.: Имедис, 2012. – 480 с.

5. Готовский Ю.В., Самохин А.В. Практическая электростимуляция по методу Р. Фолля. 5-е изд. – М.: Имедис, 2017. – 620 с.

6. Готовский М.Ю., Косарева Л.Б., Федоренко С.И., Перов Ю.Ф. Электростимуляционный вегетативный резонансный тест. 2-е изд., испр. и доп. – М.: Имедис, 2019. – 236 с.

Сведения об авторах

Галиев Анвар Лутфрахманович, доктор технических наук, профессор СФ БашГУ (Стерлитамак). E-mail: galievanvar@mail.ru.

Орлов Алексей Вениаминович, кандидат технических наук, доцент СФ БашГУ (Стерлитамак). E-mail: orlov_alexey81@mail.ru.

Юмагулов Николай Иванович, кандидат технических наук, доцент Нижневартковского государственного университета. E-mail: um_nik@mail.ru.

УДК 537.876.2

Губенко В.А., Шахобиддинов А.Ш., Хатамов А.П.

ПРОБЛЕМЫ И КОНТРОЛЬ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ В ЖИЛЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ

В статье рассматриваются побочные электромагнитные излучения, возникающие в жилых помещениях в результате работы электробытовых и радиотехнических приборов и устройств. Приводятся рекомендации по контролю их уровня.

Ключевые слова: электромагнитное поле, электромагнитное излучение, электромагнитный фон, источники излучения, датчики

Gubenko V.A., Shakhobiddinov A.Sh., Khatamov A.P.

THE PROBLEMS AND CONTROL OF ELECTROMAGNETIC RADIATION IN RESIDENTIAL AREAS

The article deals with the side electromagnetic radiation that occurs in residential premises as a result of the operation of electrical and radio-technical devices. Recommendations for controlling their level are given.

Key words: electromagnetic field, electromagnetic radiation, electromagnetic background, radiation sources, sensors.

Глобальное генерирование и использование электрической энергии во всех областях жизнедеятельности человека привело к тому, что к концу прошлого века сформировался новый экологический фактор загрязнения окружающей среды – «электромагнитный». Вследствие этого возникла проблема влияния на людей и другие биологические объекты побочных электромагнитных полей, источниками которых являются многочисленные электрические, электронные и радиотехнические системы, приборы и устройства. С каждым годом такая проблема усугубляется из-за интенсивного развития систем телекоммуникаций, использования электромагнитной энергии в различных производственных процессах, массовой эксплуатации в быту электро- и электронных приборов, широкомасштабной компьютеризации и т.п.

Результатом этого является значительное увеличение искусственного электромагнитного фона в окружающей среде, который значительно превышает фон, созданный естественными источниками. Важно отметить, что искусственный электромагнитный фон является, по большей части, долговременным, т. е. его действие на окружающую среду продолжается в течение длительного времени. Ярким примером этого являются линии электропередачи и практически все системы телекоммуникации, которые функционируют постоянно, а значит, постоянно излучают в пространство электромагнитную энергию. Уровень этой энергии определяется видом системы, ее назначением и техническими характеристиками [1].

Несмотря на то, что специальные службы постоянно контролируют уровни электромагнитных излучений и не допускают его превышения сверх норм, установленных международными организациями, такими как Международная Всемирная организация здравоохранения (WHO), Международная комиссия по защите от неионизирующих излучений (ICNIRP), Европейский комитет электротехнической стандартизации (CENELEC), Международная организация труда (MOT) и др., все равно они значительно увеличивают общий электромагнитный фон, тем самым негативно воздействуя на здоровье и жизнедеятельность людей.

Опасность электромагнитных излучений, даже слабых, заключается в том, что они никак себя не проявляют, а организм человека не воспринимает их в виде какого-либо физического воздействия. Одна-

ко их действие проявляется постепенно в виде кратковременных или долговременных недомоганий, которые люди списывают на другие их причины, никак не связанные с работой систем, устройств, приборов, генерирующих в пространство электромагнитные поля различной интенсивности. И если происходит продолжительное воздействие электромагнитного излучения на человеческий организм, то, к сожалению, очень часто это приводит к самым негативным последствиям.

Доказано, что электромагнитное излучение может являться причиной болезней гормональной, сердечно-сосудистой, нервной, кровеносной и половой систем человека, его действие приводит к онкологическим заболеваниям.

Эти заболевания лечатся различными методами и способами, однако их причина – электромагнитное поле, в котором постоянно находится человек, – никак не учитывается и не ликвидируется.

Таким образом, можно сделать следующий важный вывод: все источники электромагнитных излучений в течение их работы должны находиться под строгим контролем. При этом должны контролироваться как их местоположение, так и их уровни.

К сожалению, многие источники электромагнитных излучений являются скрытыми, т. е. их расположение, интенсивность излучения, время и продолжительность работы заранее неизвестны. Чаще всего это происходит в жилых помещениях, там, где люди проводят большую часть своего времени.

Именно такие источники являются наиболее опасными, так как их невозможно контролировать без специальных измерительных приборов, как и невозможно точно определить их вид и местоположение.

В [2] был введен термин «несанкционированное побочное излучение электромагнитного поля», причиной которого как раз являются неизвестные источники. Невозможно спрогнозировать, как будут вести себя такие источники, какое результирующее электромагнитное поле они будут формировать в пределах своего действия, какие дифракционные и интерференционные процессы будут происходить во время излучения.

Можно предполагать, что электромагнитные поля в жилых помещениях способны вызывать резонансные явления, при этом их энергетика может значительно возрасти. Это связано с тем, что жилое закрытое помещение можно представить в виде объемного резонатора, обладающего собственной резонансной частотой (прежде всего это относится к железобетонным строениям).

Существуют различные методы и способы контроля напряженности побочных электромагнитных полей внутри помещений. Многие из них хорошо себя зарекомендовали с точки зрения точности получаемых результатов измерений. Однако, несмотря на это, продолжают работы в этой области для поиска наиболее эффективных способов контроля.

Как один из них может быть предложен способ измерения не только напряженности электромагнитного поля, но и спектральных составляющих побочных электромагнитных полей. Такой подход к измерениям очень важен, поскольку, как известно, электромагнитные поля с различной частотой генерации по-разному воздействует на человеческий организм. Степень воздействия электромагнитного поля на человека на разных частотах существенно отличается: чем меньше длина волны, или выше рабочая частота излучения, тем большей потенциальной энергией оно обладает. Однако при этом глубина проникновения поля внутрь тела человека уменьшается, воздействуя в основном на поверхностные слои, нагревая их.

Влияние электромагнитных излучений в области низких частот приводит к нарушениям нормальной работы центральной нервной и сердечно-сосудистой систем человека. При этом наблюдается утомляемость, изменение кровяного давления, возникновение болей в области сердца, аритмия. Продолжительное нахождение человека в пределах действия электромагнитных полей низких частот может привести к необратимым последствиям.

Исходя из сказанного выше, требуется применение системы долговременного контроля уровня излучаемых побочных электромагнитных полей, а также их спектральных составляющих. Рассмотрим далее несколько методов контроля побочных электромагнитных излучений.

Одним из них является метод непосредственного зондирования, когда в масштабе реального времени проводятся измерения напряженности электромагнитных полей на определенных участках местности или жилого помещения. При этом необходимо наличие контрольно-измерительного устройства и оператора, на котором лежит основная работа по измерениям. Он контролирует работу измерительного оборудования, меняет его положение в месте проведения исследований.

Метод дистанционного контроля побочных электромагнитных полей позволяет увеличить эффективность измерений, автоматизиро-

вать их процесс, сделать его долговременным и безопасным, так как он проводится без участия оператора. Основой его является система специальных датчиков, размещенных в наиболее проблематичных участках исследуемой территории, в частности, в жилых помещениях. Система датчиков через канал связи подключается к центральному процессору, который собирает информацию об электромагнитном фоне, анализирует ее и выдает результат в виде, например, карты распределения поля по всей контролируемой территории.

Данный метод имеет следующие преимущества:

- возможность систематического контроля электромагнитного поля на территории без постоянного присутствия оператора с измерительным прибором;

- ведение систематической записи данных состояния электромагнитного поля на контролируемой территории;

- отслеживание динамики изменения электромагнитного поля и выявление значимых участков, где регистрируется наиболее сильное излучение в контролируемом спектре частот датчиками;

- подготовка отчета о степени электромагнитного загрязнения на контролируемой территории.

В качестве датчиков побочных электромагнитных полей могут быть использованы устройства, имеющие в своем составе антенны, способные регистрировать как электрическую, так и магнитную составляющие электромагнитного поля, и позволяющие проводить измерения в заданных диапазонах частот.

Канал связи между системой датчиков и центральным процессором может быть как проводным, так и беспроводным.

Центральный процессор должен быть оснащен программным приложением для баз данных, в которых постоянно сохраняются текущие результаты контроля, поступающие со всех регистрирующих датчиков, расположенных на контролируемой территории.

В заключение следует сказать, что такой метод контроля побочных электромагнитных излучений в жилых помещениях особенно эффективен при внедрении его в систему «умный дом», поскольку современное жилище человека наполнено огромным количеством источников электромагнитного излучения, которые необходимо постоянно контролировать [3].

Библиографический список

1. Хабигер Э. Электромагнитная совместимость. Основы ее обеспечения в технике. М.: Энергоатомиздат, 1995. – 304 с.
2. Губенко В.А., Хатамов А.П. Проблемы и задачи снижения побочных электромагнитных излучений в жилых помещениях // Доклады РНТК ТУИТ. Ташкент 2020. С. 30-32.
3. Губенко В.А., Хатамов А.П. Анализ и классификация электромагнитных полей и их источников // Инфокоммуникации: сетитехнологии-решения 2020. №3(55). – С. 33-39.

Сведения об авторах

Губенко Владислав Анатольевич, кандидат технических наук, доцент ТУИТ имени Мухаммада ал-Хоразмий, E-mail: 1step2@mail.ru

Шахобиддинов Алишер Шопатхитдинович. PhD, доцент ТУИТ имени Мухаммада ал-Хоразмий, E-mail: alishah@list.ru.

Хатамов Артур Пулатович, старший преподаватель ТУИТ имени Мухаммада ал-Хоразмий, E-mail: ahatamov4@yandex.ru.

УДК 550.8.07

Денисова О.А., Щеглов А.В.

ПОСТРОЕНИЕ ФАЦИАЛЬНОЙ МОДЕЛИ

В статье рассматриваются методы построения фациальной модели.

Ключевые слова: моделирование, геология, литология, фация.

Denisova O. A., Shcheglov A.V.

CONSTRUCTION OF A FACIAL MODEL

The article discusses the methods of constructing a facial model.

Keywords: modeling, geology, lithology, facies.

Создание фациальной модели пласта является одной из первых задач, которую следует выполнить при моделировании изучаемого объекта, так как она закладывает концептуальные основы литологической модели пласта, а в конечном счете соответствии полученной модели реальному объекту.

Фа́ция – это часть разновозрастного слоя, характеризующаяся специфическими признаками (состав, структура, текстура и т.д.), отличающимися от соседних частей этого слоя, благодаря условиям их образования. Примеры обстановок: дельты, побережья, периодически затопливаемые морем, дно моря и подводный береговой склон с конусами выноса.

Фации определяют в геологической модели пространственное распределение типов пород – литотипов, которые в свою очередь влияют на распределение коллекторских свойств в модели.

Основой для фациального анализа являются данные керна, каротажа и сейсморазведки.

Тип породы имеет разную вероятность встречи в разных фациях. Но в то же время меняются свойства каждого типа пород. Например, песчаник в русловой промытой зоне потока и песчаник в дистальном фронте накопления будут иметь различные параметры (прежде всего проницаемости).

Для каждой фациальной обстановки установлена латеральная и вертикальная последовательность фаций. Фациальная модель строится на базе определения фациальных ассоциаций, типичных для той или иной области условий осадконакопления.

В процессе моделирования описывается и предсказывается геометрия, размеры и распределение типов пород.

Для каждой физико-географической обстановки характерна латеральная и вертикальная последовательность лито-фаций. На основе анализа кернового материала и данных ГИС, а также на базе определения фациальных ассоциаций, типичных для определенных условий осадконакопления строится фациальная модель пласта. С учетом построенной фациально-фациальной модели, на основе интерпретации данных сейсморазведки, уточняются пространственные границы выделенных лито-фаций.

При фациальном моделировании, как правило, используются детерминистические или полудетерминистические подходы. Полученные на стадии 2D построений карты-схемы обстановок осадконакопления используются для моделирования кубов фаций. Тем не менее возможно использование и стохастических методов моделирования.

Моделирование куба фаций может проводиться, например, с помощью метода «Truncated Gaussian Simulation» и «Truncated Gaussian Simulation with trend». При моделировании задается карта фациальных зон для каждого моделируемого объекта (пласта или седимента-

ционного цикла), ширина переходной области между фациальными зонами. Фациальный тренд определяется в соответствии с проградацией, которая присутствует в геологической модели. Вспомогательным параметром является переменная Variance, регулирующая степень проникновения одной фации в другую.

Результатом построения карт фаций является трехмерный куб обстановок осадконакопления. Куб фаций осадконакопления представляет собой дискретный куб, в котором каждой зоне условий осадконакопления присвоен свой индекс.

После создания куба фаций выполняется литологическое моделирование с учетом закономерностей литотипов в каждой фациальной обстановке. Каждому фациальному комплексу соответствует свой набор литологических ассоциаций. Каждый литотип характеризуется определенной вероятностью встречи для каждого фациального комплекса. Исходными данными при построении модели являются литологические кривые, выделенные в скважинах.

При обосновании набора литологических комплексов в скважинах, используемых при геологическом моделировании, рекомендуется руководствоваться следующими критериями:

- выделенные литотипы должны отличаться распределениями значений пористости, проницаемости или функциями насыщения, в противном случае моделирование значительного количества типов пород в итоге не приведет к уменьшению неопределенности в распределении фильтрационно-емкостных свойств пласта;
- литотипы должны хорошо идентифицироваться как по керну, так и по материалам ГИС;
- выделенные литотипы должны иметь простые и объяснимые пространственные закономерности изменения.

При ряде условий осадконакопления, особенно когда речь идет о меандрирующей реке, когда песчаные каналы в залежи представляют собой главный объект изучения пласта, эти модели могут давать очень достоверные изображения распределения присутствующих в пласте фаций. Наиболее успешным применение этого метода оказывается при низких значениях песчанистости.

Моделирование на основе объектов исходит из простого предположения, что различные фации ассоциированы с хорошо известными геометрическими формами. Предполагается также, что размеры этих форм (ширина, толщина, длина) являются случайными и что их статистические характеристики могут быть заданы геологом. При моде-

лировании могут быть также задан ряд ограничений, касающихся взаимного расположения фациальных тел (например, пойменные про-слои, появляющиеся в результате выноса осадков за границы русла, должны всегда находиться вблизи русла). Для контроля пропорций между различными объектами по вертикали или горизонтали используются тренды.

Объектные методы моделирования показывают хорошие результаты в случаях, когда расстояния между скважинами намного больше горизонтальных размеров моделируемых объектов. Однако, когда размеры песчаных тел превышают межскважинные расстояния, согласование реализаций со скважинными данными становится достаточно сложной задачей. В этом случае рекомендуется использование пиксельных методов моделирования.

Наиболее популярным методом пиксельного литологического моделирования является индикаторный метод. В отличие от объектно-ориентированных алгоритмов, в пиксельных методах не делается никаких предположений о форме осадочных тел.

Исходными данными для индикаторного моделирования являются, так называемые, «индикаторные переменные», указывающие на присутствие или отсутствие исследуемой фации вдоль скважины. Для каждой индикаторной переменной рассчитывается ее вариограмма, которая показывает вероятность того, что значения индикаторной переменной, обнаруженные в разделенных соответствующем расстоянием двух точках будут различны. Чаще всего для индикаторных вариограмм используются сферические и экспоненциальные модели. По принятым вариограммам оцениваются значения порога вариограммы и рангов корреляции индикаторных переменных.

Принимая во внимание тот факт, что индикаторная вариограмма одновременно описывает распространение, например, «глин» и «не глин», очевидно, что ее радиус не может одновременно характеризовать размер всех литотипов.

После того, как модель экспериментальной вариограммы индикаторной переменной подобрана, выполняется ее стохастическое моделирование. Чаще всего используется алгоритм последовательного индикаторного моделирования (Sequential Indicator Simulation). Современные программные комплексы геологического моделирования позволяют использовать в качестве исходных данных при моделировании вертикальные и латеральные тренды, отражающие вероятности встречи литотипов в плане и по разрезу. При использовании SIS важ-

но рассчитать достаточное количество реализаций для исключения «стохастического шума» и адекватного воспроизведения трендовых карт в модели. При малом числе реализаций на картах средних параметров из модели возникают вариации литологии и ФЕС, не обусловленные скважинными данными и трендовыми картами. Оценки показывают, что в зависимости от сложности литологического строения пласта требуется от 11 до 51 реализации или более.

Часто применяется метод многоточечной статистики (Multiple Point Statistics). Этот метод сочетает в себе преимущества пиксельных методов и достоинства объектно-ориентированных подходов. В методе MPS значение каждой ячейки моделируется индивидуально, при этом в явном виде используются концептуальные модели фаций, реализованные в виде обучающих образов.

Использование метода MPS накладывает ряд ограничений, которым необходимо следовать. Эти ограничения связаны с формированием обучающих образов:

- трехмерность: в качестве обучающего образа используется 3D куб;
- стационарность: постоянство статистических характеристик обучающего образа во всем его объеме;
- повторяемость: многократное повторение одних и тех же текстурных элементов;
- неперiodичность: части обучающего образа не должны быть точной копией друг друга, текстурные элементы должны повторяться в различных комбинациях, отражая все возможные варианты;
- относительная простота: обучающий образ не должен изобиловать сложными деталями, которые не могут быть воспроизведены в реализации;
- масштаб и ориентация обучающего образа, определяемые в ячейках модели, должны быть заданы в соответствии с моделируемым полем;
- статистические параметры, такие как среднее значение, вариogramмы, удельная расчлененность, приведенная на число ячеек, размеры тел должны соответствовать данным по скважинам и целевым значениям.

Библиографический список

1. Безбородов Р.С. «Основы фациального анализа осадочных толщ», РУДН, Москва, 2000 г., 206 стр., ISBN: 5-209-01021-х.

2. Исаев Г.Д. «Основы биоседиментологии и региональный фациальный анализ», Гео, Новосибирск, 2006 г.

3. Рекомендации к методике построения геологических моделей при подсчете запасов углеводородного сырья, ФБУ ГКЗ, Москва, 2014 г.

4. Цейслер В.М. «Основы фациального анализа», Книжный Дом "Университет", Москва, 2008 г.

Сведения об авторах

Денисова Ольга Аркадьевна, доктор физико-математических наук, профессор УГНТУ (Уфа). E-mail: denisovaOA@mail.ru.

Щеглов Андрей Владимирович, магистр, УГНТУ (Уфа). E-mail: asugoz@rambler.ru.

УДК 550.8.07

Денисова О.А., Щеглова Е.П.

ПОСТРОЕНИЕ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ МАЛЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

В статье рассматриваются этапы построения геологической модели, а также проблемы моделирования малых месторождений.

Ключевые слова: моделирование, геология, литология, фация.

Denisova O.A., Shcheglova E.P.

CONSTRUCTION OF A GEOLOGICAL MODEL OF SMALL DEPOSITS

The article discusses the stages of constructing a geological model, as well as the problems of modeling small deposits.

Keywords: modeling, geology, lithology, facies.

Построение трехмерных цифровых геологических моделей в настоящее время уже стало естественной составляющей технологических процессов обоснования бурения скважин и составления планов разработки месторождений углеводородов, включая оценку экономической эффективности предлагаемых геолого-технологических мероприятий. В значительной степени это связано с усложнением строения разрабатываемых месторождений и новыми технологиями добычи, например, бурением горизонтальных скважин.

Несмотря на богатейшие традиции геологической науки России (более трехсот лет основания горного дела в России согласно указу Петра I), построение трехмерных цифровых геологических моделей нефтяных и газовых месторождений является в нашей стране относительно молодым направлением в прикладной нефтегазовой геологии.

Появление трехмерного геологического моделирования как самостоятельного направления оказалось возможным вследствие следующих основных факторов:

- разработки математических принципов и алгоритмов трехмерного моделирования,
- развития смежных областей геологического и геофизического знания,
- обработки и интерпретации 3D сейморазведки, сиквенс-стратиграфии, а также трехмерного гидродинамического моделирования,
- появления достаточно мощных компьютеров и рабочих станций, позволяющих выполнять сложные математические расчеты с достаточным быстродействием и визуализацией результатов,
- разработки коммерческих программ, обеспечивающих цикл построения трехмерных моделей (загрузка, корреляция, картопостроение, построение кубов ФЕС, визуализация, анализ данных, выдача графики и др.),
- накопления обширного опыта двумерного геологического моделирования, подсчета запасов и нефтегазопромысловой геологии.

Таким образом, начало работ по трехмерному геологическому моделированию в России естественным образом связано с появлением на рынке в 1993–94 годах и началом продаж программ Stratamodel (Landmark), IRAP RMS (Smedvig Technologist), несколько позже — Petrel (Shlumberger).

Непосредственно перед моделированием необходимо проделать работу, которая предваряет 3D моделирование и без которой невозможно построить адекватную цифровую геологическую модель 3D:

- построение концептуальной (принципиальной) геологической модели. Под этим понимается определение условий осадконакопления пластов и их тектонического развития, разработка на этой основе принципов корреляции стратиграфических границ, определение местоположения границ фациальных зон, закономерностей формирования коллекторов, изменения их свойств по площади и по разрезу для каждой фациальной зоны,

- построение флюидальной модели. Это определение положения межфлюидных контактов в скважинах и, на этой основе, построение поверхностей флюидных контактов в межскважинном пространстве.

Традиционно технология геологического моделирования 3D представляется в виде следующих основных этапов (рис.2.7):

1. Сбор, анализ и подготовка необходимой информации, загрузка данных.
2. Структурное моделирование (создание каркаса).
3. Создание сетки (3D грида), осреднение (перенос) скважинных данных на сетку.
4. Фациальное (литологическое) моделирование.
5. Петрофизическое моделирование.
6. Подсчет запасов углеводородов.

В зависимости от поставленной задачи возможно исключение каких-либо этапов или их повторение. Поскольку традиционная схема подробно освещается в руководствах пользователей, остановимся на ней кратко.

После загрузки исходных данных и создания рабочего проекта создается структурно-стратиграфический каркас модели. Для этого предварительно выполняется корреляция скважин (проставляются разбивки пластов в скважинах), прослеживаются опорные сейсмические горизонты, создается модель тектонических нарушений. На этой основе в рамках заданных границ участка моделирования и при выбранных горизонтальных размерах ячеек строится каркас, состоящий из горизонтов – стратиграфических границ пластов, посаженных на корреляционные разбивки и увязанных с поверхностями тектонических нарушений.

В рамках этого каркаса с учетом закономерностей осадконакопления для каждого пласта выполняется тонкая «нарезка» слоев, создавая таким образом трехмерную сетку (3D грид). На ячейки сетки вдоль траекторий скважин выполняется перенос (осреднение) результатов интерпретации ГИС.

– кривых фаций, литологии, пористости, нефтенасыщенности и др. Иногда эта процедура называется ремасштабированием.

По этим скважинным данным, используя результаты интерпретации сейсморазведки в качестве трендовых параметров (если они есть), рассчитываются кубы свойств в ячейках сетки в межскважинном пространстве.

В начале – дискретный куб фаций (литологии). Затем, с учетом вида распределения и пространственных закономерностей для каждой фации, строятся непрерывные кубы пористости K_p и проницаемости $K_{пр}$.

Непрерывный куб нефтегазонасыщенности $K_{нг}$ рассчитывается исходя из данных о свойствах пород (K_p , $K_{пр}$), пластовых флюидов и закономерностей капиллярно-гравитационного равновесия (модели переходной зоны). Правда, для некоторых типов пород переходная зона может и отсутствовать. Предварительно для каждого пласта строятся поверхности флюидных контактов.

На основе этих кубов ФЕС производится подсчет запасов углеводородов, проектирование скважин, модель передается гидродинамикам для фильтрационных расчетов. С появлением новой информации (бурение скважин, отстрел новых сейсмических кубов 3D, выполнение дополнительных исследований керна и др.) модель дополняется и корректируется. Другой причиной корректировки геологической модели могут служить замечания гидродинамиков, обоснованные результатами адаптации фильтрационной модели в процессе воспроизведения истории разработки.

При моделировании малых месторождений часто сталкиваются со следующими проблемами:

- Не хватка данных – решается привлечением данных соседнего месторождения;
- Отсутствие детальной сейсмике исследуемой площади – можно решить переинтерпритацией имеющихся данных;
- Скважины вытянуты в линию – в данном случае для корректной работы интерполятора, необходимо вводить фиктивные скважины.

Библиографический список

1. Гладков Е.А. «Геологическое и гидродинамическое моделирование месторождений нефти и газа», ТПУ, Томь, 2012 г.– 84 с.
2. Закревский К.Е. «Геологическое 3D моделирование», ООО ИПЦ Маска., Москва, 2009 г.– 376 с.
3. Рекомендации к методике построения геологических моделей при подсчете запасов углеводородного сырья, ФБУ ГКЗ, Москва, 2014 г.

Сведения об авторах

Денисова Ольга Аркадьевна, доктор физико-математических наук, профессор УГНТУ (Уфа). E-mail: denisovaOA@mail.ru.

Щеглова Екатерина Павловна, магистр, УГНТУ (Уфа). E-mail: Ekaterina-shcheglova@rambler.ru.

УДК 621.372

Ёдгорова Д.М., Шерматов Ж.Г., Закиров Р.Г.

ПРИМЕНЕНИЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ ДЛЯ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ КОМПОЗИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

В статье рассматривается возможность применения волоконно-оптических датчиков на основе решетки Брэгга для постоянного мониторинга изделий из композитных материалов. Приведены основные характеристики и функциональные зависимости решетки Брэгга.

Ключевые слова: Композитный материал, мониторинг, волоконно-оптический датчик, решетка Брэгга, спектр сигнала.

Yodgorova D.M., Shermatov J.G., Zakirov R.G.

APPLICATION OF FIBER OPTICAL SENSORS FOR THE COMPOSITE STRUCTURES CONDITIONS MONITORING

The paper discusses the possibility of using fiber-optic sensors based on a Bragg grating for continuous monitoring of construction elements made of composite materials. The main characteristics and functional dependences of the Bragg lattice are presented.

Keywords: Composite material, monitoring, fiber optic sensor, Bragg grating, signal spectrum.

В настоящее время в различных отраслях деятельности все большее применение находят композитные материалы. Особенностью изделий из композитных материалов является необходимость их периодического контроля на предмет обнаружения внутренних деформаций, возникающих в процессе эксплуатации изделия и, в случае их несвоевременного устранения, приводящих к полному разрушению композитного изделия.

До недавнего времени, наиболее эффективным способом периодического контроля состояния изделий из композитных материалов являлось применение различных методов неразрушающего контроля (ультразвуковой контроль, радиографический контроль, метод красок

и др.). Однако, в последнее время, более высокую эффективность применения показывает метод мониторинга состояния конструкции.

Мониторинг состояния конструкции представляет собой процесс непрерывного отслеживания ее параметров с целью предупреждения повреждений. В отличие от методов неразрушающего контроля, где требуется периодическая приостановка эксплуатации изделия, мониторинг состояния конструкции проводится непрерывно непосредственно при выполнении изделием своих функций.

Таким образом, применение непрерывного мониторинга состояния конструкции позволяет выявлять разрушения в самом начале их появления, не дожидаясь наступления времени очередного технического обслуживания. Раннее выявление дефектов позволяет произвести ремонт изделия до того момента, как разрушение достигнет критического с точки зрения ремонтпригодности состояния. Кроме того, для выполнения мониторинга не требуется демонтаж-монтаж композитных элементов конструкции, что экономит время и трудозатраты на выполнение этих работ [1].

Вышеперечисленные факторы позволяют получить экономический эффект за счет сокращения трудозатрат на демонтаж-монтаж и предотвращения разрушения изделия из композитного материала путем выполнения своевременного ремонта.

Наиболее оптимальным средством реализации непрерывного мониторинга изделий из композитных материалов является применение в составе этих изделий волоконно-оптических кабелей с Брэгговскими решетками, представляющими собой надежные средства для измерения локальных деформаций. При изготовлении таких конструкций волоконно-оптические кабели могут быть встроены между слоями полимерных пластин, из которых состоит изделие из композита, что позволяет измерять локальную деформацию внутри конструкции.

В отличие от электрических тензометрических датчиков, которые могут наноситься только на поверхность изделия, волоконно-оптические датчики могут быть использованы для определения локальной деформации внутри объема изделия. При использовании распределенных датчиков может быть получена дополнительная информации о нагрузке, приложенной к конструкции [2].

В настоящей работе рассматриваются примеры новой области применения волоконно-оптических датчиков на основе волоконных

брегговских решеток (ВБР, англ. FBG-Fiber Bragg Grating), используемых для оценки состояния конструкции.

Волоконная брэгговская решетка (ВБР), схематически представленная на рис.1, представляет собой периодическую структуру, изготовленную непосредственно в сердцевине волоконного световода. Структура представляет собой модуляцию показателя преломления вдоль волокна. Как правило, такую структуру можно представить в виде периодических штрихов-участков сердцевинны волокна с измененным показателем преломления. Такие штрихи располагаются перпендикулярно оси волоконного световода [3].

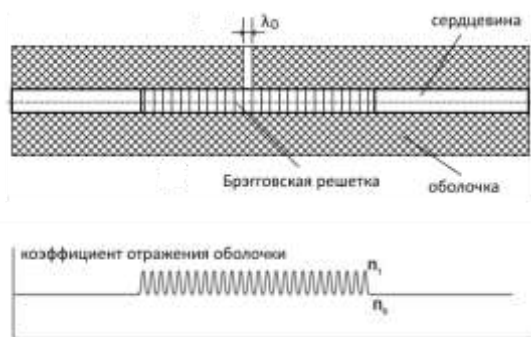


Рис.1 Зависимость коэффициента преломления n от периода решетки λ_0

Обнаружение внутреннего дефекта происходит за счет изменения спектра сигнала при его отражении от внутреннего дефекта или при деформации оптоволокна.

При этом, основными параметрами, характеризующими решетку Брэгга являются период λ_0 и показатель преломления n . Коэффициент эффективности решетки Брэгга можно выразить соотношением:

$$\delta n_{eff}(z) = A(z) \bar{\delta n}_{eff} [1 + \zeta \cos[(2\pi / \lambda_0)z + \phi(z)]]$$

где z -координата на продольной оси оптоволокна, по которому распространяется оптический сигнал. Начало координат совпадает с центром решетки Брэгга. Координата z лежит на отрезке $-L/2 < z < L/2$, $\phi(z)$ -фаза импульса, $\bar{\delta n}_{eff}$ - пространственное

смещение усредненного пикового показателя преломления, $A(z)$ – функция распределения для подавления спектра боковых лепестков.

Сравнение спектральных характеристик сигналов (зависимость мощности сигнала от длины волны) приводится на рис.2.

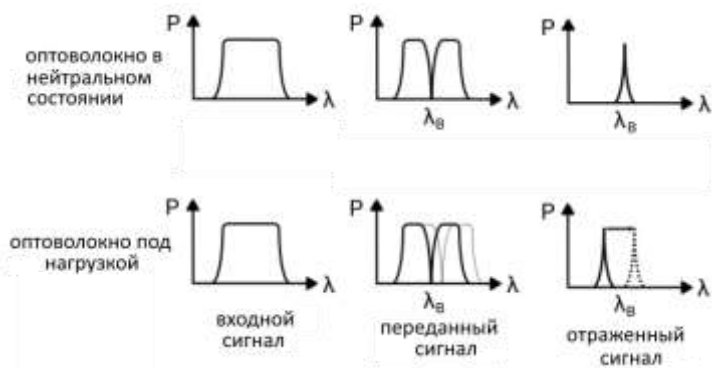


Рис.2. Сравнение сдвигов проходящей и отраженной длины волны при напряженной ВБР

Данное сравнение позволяет использовать полосу пропускания ВБР как независимую функцию для корреляции ширины спектров оптоволокна в наряженном и нормальном состояниях. Увеличение пропускной способности спектров ВБР достигается путем создания волоконно-оптического профиля с одинаковой величиной деформации по всей длине ВБР при растяжении и сжатии. Таким образом, принцип работы волоконно-оптического датчика основан на измерении пикового спектрального сдвига длины волны, который зависит от величины деформации и ширины полосы спектра ВБР.

Как следует из приведенных соотношений для волоконно-оптических датчиков контроля состояния композитных конструкций, наиболее эффективным можно назвать применение датчиков на основе решетки Брэгга. Датчик такого типа имеет более высокую точность по сравнению с существующими распределенными датчиками состояния конструкций. Это достигается измерением на нескольких длинах волн и последующим усреднением регистрируемого сигнала, что обеспечивается применением в качестве чувствительного элемента оптического волокна с интегрированной в него решеткой Брэгга,

имеющего широкий спектральный диапазон режимов работы. Использование описанного в статье датчика дает возможность определения направления деформаций, а измерение обратного рассеяния определения их локализации по длине волокна.

Библиографический список

1. H. Sohn, J. A. Czarnecki, and C. R. Farrar. Structural Health Monitoring Using Statistical Process Control. Journal of Structural Engineering 126(11): 1356-1363, 2000.
2. S. W. Doebling, C. R. Farrar, M. B. Prime, D. W. and Shevitz. A Review of Damage Identification Methods That Examine Changes in Dynamic Properties. Shock Vib. Dig 30(2):91-105, 1998.
3. Гуляев, Ю.В. Волоконно-оптические технологии, устройства, датчики и системы / Ю.В. Гуляев, С.А. Никитов, В.Т. Потапов, Ю.К. Чаморовский // «Фотон-экспресс». – 2005. – № 6. – С. 114-127.

Сведения об авторах

Ёдгорова Дилбара Мустафаевна, доктор технических наук, профессор ФТИ АНРУз (Ташкент) E-mail: yodgorova@uzsci.net.

Шерматов Жамолиддин Гафурович магистр Ташкентского Государственного технического университета им. И. Каримова e-mail: jamoliddinshermatov96@gmail.com.

Закиров Руслан Гильмуллаевич, PhD по техническим наукам, НИИ Физитки полупроводников и микроэлектроники при Национальном Университете Узбекистана. e-mail: zrg1980@mail.ru.

УДК 681.324

Зарипов О.О., Закиров Р.Г., Умаров А.А.

СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ И КОНСТРУКЦИИ ВОЗДУШНОГО СУДНА

В статье рассматриваются возможности применения системы мониторинга состояния компонентов, силовой установки и элементов композитной конструкции воздушного судна. Приводится анализ положительных и отрицательных сторон применения данной системы

Ключевые слова: Воздушное судно, мониторинг, композитная конструкция, ресурс, техническое обслуживание.

Zaripov O.O., Zakirov R.G., Umarov A.A.

**AIRCRAFT EQUIPMENT AND STRUCTURE TECHNICAL
CONDITIONS MONITORING SYSTEM**

The article discusses the possibilities of using of aircraft components, power plant and elements of the composite structure conditions monitoring system. The analysis of the positive and negative aspects of the application of this system is considered.

Keywords: Aircraft, monitoring, composite structure, operation limit time, maintenance.

В настоящее время все большее распространение получают системы мониторинга технического состояния оборудования, двигателей и конструкции воздушных судов. В функции данных систем входит сбор данных для диагностики и прогностики исправности силовой установки, критически важных для безопасного полёта агрегатов и деталей планера воздушного судна.

Объектами контроля систем мониторинга являются, прежде всего, механические детали, подверженные износу в процессе работы: редукторы, подшипники, валы, несущий винт вертолётa и т.п. [1].

Диагностика заключается в определении текущего состояния объекта контроля и соответствия этого состояния исправному. На основе собранных системой мониторинга данных, обслуживающим персоналом принимается решение о продолжении эксплуатации данного компонента воздушного судна, или о замене на исправный.

Прогностика заключается в наблюдении за параметрами компонента или элемента конструкции воздушного судна в течение заданного периода времени, выявлении опасных тенденций и в прогнозе оставшегося ресурса. На основе прогноза планируется техническое обслуживание, ремонт или замена неисправного компонента на кондиционный.

Агрегаты и детали конструкции воздушного судна, подлежащие мониторингу технического состояния, о которых идёт речь, обычно эксплуатируются по ресурсу. Из опыта эксплуатации каждому из них устанавливают назначенный ресурс в лётных часах и срок службы в календарных годах, а по исчерпанию ресурса/срока службы они заменяются новыми, а сами отправляются на капитальный ремонт или утилизируются [2].

При этом назначенный ресурс, устанавливается с определённым запасом, поэтому реальный ресурс агрегата или элемента конструкции воздушного судна расходуется неэффективно. С другой стороны, назначенный ресурс - величина статистическая, он не гарантирует, что данный агрегат прослужит ровно столько, сколько ему положено.

Следовательно, назначенный ресурс, не гарантирует исправности компонента в течение заданного ресурса. Поэтому большое значение имеет оценка состояния компонента в режиме реального времени. Это и является основной функцией системы мониторинга.

Система с помощью набора датчиков измеряет параметры компонентов и элементов конструкции воздушного судна, которые позволяют диагностировать его техническое состояние, и записывает эти данные на какой-либо носитель информации для послеполётного анализа. Данные используются не только для оценки исправности, но и для определения необходимости проведения технического обслуживания, например, для балансировки и обеспечения соконусности несущего и рулевого винтов.

Также система мониторинга следит за режимами работы компонентов и нагрузками на элементы конструкции воздушного судна, а также за тем, насколько правильно он эксплуатируется лётным экипажем. Предельные режимы, такие как жёсткая посадка или чрезвычайный режим работы двигателя, сокращают срок службы компонента, поэтому система мониторинга их также фиксирует. Кроме того, система отслеживает и регистрирует многие другие параметры, такие как скорость полёта, температура наружного воздуха, которые напрямую не относятся к состоянию контролируемых компонентов, но помогают определить их фактический режим работы, а следовательно, и скорость расходования ресурса [3].

На земле технический персонал получает записанные системой данные и вводит их в компьютер для анализа. Диагностику и прогнозирование технического состояния выполняют компьютеры и обслуживающий их персонал. Но некоторые данные системы мониторинга используют и в полёте. В такой системе сигналы с датчиков не просто записываются, но и контролируются системой. Если контролируемый сигнал превышает установленный порог, что свидетельствует о предотказном состоянии соответствующего компонента, система мониторинга при помощи электронной индикации предупреждает об этом экипаж и, если такая возможность предусмотрена, передаёт информацию по линии передачи данных (например, ACARS) на сервер экс-

плуатирующей организации. Эта информация позволяет бригаде технического обслуживания заранее подготовиться к обслуживанию воздушного судна, на котором обнаружили проблемы.

Таким образом, задачи системы мониторинга состояния компонентов, силовой установки и элементов конструкции воздушного судна схожа с эксплуатационным регистратором, отличаясь только номенклатурой датчиков и назначением записываемой информации, поэтому иногда эти системы объединяют.

Наибольший интерес представляет недавно внедренная на воздушных судах типа AIRBUS-350 и BOEING-787 система мониторинга целостности структуры элементов конструкции из композитных материалов (отсутствие трещин, расслоений, коррозии) [4]. Дефекты определяются с помощью акустических, ультразвуковых, оптоволоконных и других типов датчиков. Аналоговые сигналы с датчиков поступают в электронный блок, преобразуются в цифровую форму, обрабатываются сигнальным процессором, в частности, фильтруются от помех и шумов, после чего записываются на съёмный носитель информации. Дополнительно к диагностической информации датчиков процессор этого блока получает по бортовым интерфейсам и записывает контекстную информацию: текущая скорость, высота, режим работы двигателя и т.п.

На земле техник извлекает съёмный носитель и переносит его на компьютер, где и производится анализ данных. Передача данных из системы мониторинга может осуществляться и по беспроводной связи. Анализ разбивается на два этапа: диагностику и прогностику.

Диагностика осуществляется специалистом эксплуатирующей организации, который на компьютере с помощью программы автоматизированной обработки данных обрабатывает записанные в полёте данные и выявляет наличие проблем: превышений допустимых значений, нарушений режимов эксплуатации и др. Здесь же рассчитывается остаточный ресурс элемента конструкции. В случае наличия проблемы выясняется её причина, локализуется место возникновения и рекомендуются действия по техническому обслуживанию, которые эту проблему устранят.

Системы мониторинга технического состояния воздушного судна позволяют выявлять проблемы на той стадии их развития, когда они ещё не успели привести к отказам. Уменьшается трудоёмкость технического обслуживания, экономнее расходуются запчасти, снижаются прямые эксплуатационные расходы и, как следствие, растёт

экономическая эффективность. Отпадает необходимость в проведении ряда периодических работ и выполнения тестов бортового оборудования. Внедрение систем мониторинга технического состояния позволяет приблизиться к эксплуатации компонентов и элементов конструкции воздушного судна по состоянию, что гораздо выгоднее, чем существующая практика их эксплуатации по ресурсу.

Заблаговременное устранение возникающих проблем повышает готовность воздушного судна к полёту, что важно с экономической точки зрения. Уменьшается количество незапланированных замен компонентов и выполнения ремонтов элемента конструкции воздушного судна, так как отказы и неисправности выявляются на ранних стадиях и появляется возможность заранее планировать их устранение. Это приводит к увеличению срока службы узлов и воздушного судна в целом, поскольку удаётся избежать разрушений и других тяжёлых последствий.

Основным препятствием на пути широкого внедрения систем мониторинга технического состояния воздушного судна стали высокая трудоёмкость её создания и связанная с этим высокая стоимость аппаратуры и программного обеспечения, считая и наземную часть системы. Впоследствии возникла ещё одна проблема: стало понятно, что система не оправдывает ожиданий и выданных ей авансов. Достоверному и своевременному выявлению отказов препятствует недостаточная полнота охвата контролем и неготовность научной базы. Сложно внедрять датчики на уже готовое воздушное судно. Например, в композитную деталь датчик должен быть введён ещё на этапе её изготовления.

Тем не менее, надежды на решение основных проблем остаются, а тематика мониторинга технического состояния компонентов, силовой установки и элементов конструкции воздушных судов продолжает развиваться.

Библиографический список

1. Health. and Usage Monitoring Systems Toolkit. – IHS, 2013.
2. Maier A., Benassi L., Stolz C. RTO-EN-A VT-156. Structural Health Monitoring of Repairs. – Praga: NATO, 2010. – 12 p.
3. Adams C. HUMS Technology//Avionics. – 2012.– № 5.– P.24-29.
4. Hangge M. Can you Afford a HUMS and HFDM System // Rotor & Wing. – 2014. – № 9. –P. 30-35.

Сведения об авторах

Зарипов Орипжон Олимович, доктор технических наук, профессор, Ташкентский государственный технический университет. E-mail: o.zaripov@edu.uz.

Закиров Руслан Гильмуллаевич, PhD по техническим наукам, НИИ Физики полупроводников и микроэлектроники при Национальном Университете Узбекистана. e-mail: Ruslan.Zakirov@uzairways.com.

Умаров Азизбек Алишер угли, Ташкентский государственный технический университет. e-mail: king1995.au@gmail.com.

УДК 615.847.8

Каплан М.Б.

СБОРКА ИНТЕГРАЛЬНОЙ МЕТОДИКИ ДЛЯ УСТРОЙСТВА ГРУППОВОЙ МАГНИТОТЕРАПИИ

В статье предлагается подход к формированию методики управления устройством, предназначенного для проведения групповой магнитотерапии.

Ключевые слова: магнитотерапия, групповая физиотерапия, магнитное поле

Kaplan M.B.

ASSEMBLING AN INTEGRAL TECHNIQUE FOR A GROUP MAGNETOTHERAPY DEVICE

The paper proposes an approach to the formation of a control technique for a device designed for group magnetotherapy.

Keywords: magnetic therapy, group physiotherapy, magnetic field.

Новый подход в физиотерапии заключается в использовании устройств, предназначенных для одновременного лечения нескольких пациентов. Практическая реализация возможно при условии применения распределенной структуры формирователей лечебного воздействующего фактора и развитой системы управления устройством [1]. Так, при проведении групповой магнитотерапии, магнитотерапевти-

ческий аппарат должен включать в свой состав полеформирующую систему, состоящую из совокупности индукторов-электромагнитов, каждый из которых имеет возможность работать по индивидуальной программе генерации магнитного поля. В качестве прототипа устройства для групповой магнитотерапии рассматривается магнитотерапевтический аппарат серии «РелаксМАГ» [2]. Одним из актуальных вопросов является создание так называемой интегральной методики, определяющей последовательности управляющих сигналов для каждого элемента полеформирующей системы аппарата.

Предпочтительным решением формирования интегральной методики является использование в качестве исходных данных сведений, содержащихся в магнитотерапевтических методиках, применяемых для лечения отдельного пациента, а также проведение предварительного этапа группировки полеформирующих элементов. Следует отметить, что интегральная методика должна быть сгенерирована для проведения каждой конкретной физиопроцедуры, ориентированной на лечение текущей группы из n пациентов.

Магнитотерапия, рассматриваемая в рамках лечения i -го пациента группы, проводится путем использования i -го набора полеформирующих элементов, функционирующих в рамках генерации воздействия, направленного на лечение заболевания этого пациента. Работа отдельного полеформирующего элемента определяется фиксированным набором параметров. Однако индивидуальность лечения достигается за счет использования собственной последовательности изменения значений параметров элементов. Кроме того количество элементов и длительность процедуры необходимые для реализации магнитотерапевтического воздействия для каждой i -ой методики свое. Для магнитотерапевтического аппарата конечный элемент полеформирующей системы представлен индуктором-электромагнитом, для которого изменяемым во времени параметром является электрический ток $I(t)$.

Таким образом, i -ая магнитотерапевтическая процедура m_i описывается как объединение k_i зависимостей изменений управляющих токов для индукторов-электромагнитов

$$m_i = \bigcup_{s=1}^{k_i} I_{s,i}(t) = \{I_{1,i}(t), ..., I_{s,i}(t), ..., I_{k_i,i}(t)\},$$

где k_i – количество индукторов-электромагнитов, необходимых для реализации i -ой магнитотерапевтической процедуры, $I_{s,i}(t)$ – закон изменения тока индуктора, расположенного на позиции s .

Тогда интегральная методика представляет собой объединение магнитотерапевтических процедур группы для n пациентов

$$M = \bigcup_{i=1}^n m_i = \bigcup_{i=1}^n \bigcup_{s=1}^{k_i} I_{s,i}(t).$$

При этом для упрощения считаем, что индуктор используется для реализации процедуры только одного пациента и генерируемое им магнитное поле не влияет на другого пациента, одновременно проходящего лечение при групповой терапии, что вполне допустимо, при значительном расстоянии между группами индукторов. В магнитотерапевтическом аппарате серии «РелаксМАГ» каждый индуктор обладает уникальным адресом d . В рамках интегральной методики индуктору присваивается его принадлежность к i -ой магнитотерапевтической методике, а в масштабе самой i -ой методики индуктор занимает пространственное положение s .

Практическая реализация зависимости изменения тока во времени по заданному закону приводит к необходимости перехода от непрерывного представления к дискретному, в результате чего ток описывается в виде последовательности уровней I^j формируемых в течение заданной длительностью Δt^j :

$$I_{s,i}(t) \rightarrow (I_{s,i}^1, \Delta t_{s,i}^1), \dots, (I_{s,i}^j, \Delta t_{s,i}^j), \dots, (I_{s,i}^p, \Delta t_{s,i}^p) = \{(I_{s,i}^j, \Delta t_{s,i}^j)\},$$

$$T_{s,i} = \sum_{j=1}^p \Delta t_{s,i}^j,$$

где $T_{s,i}$ – общее время работы индуктора-электромагнита установленного в позиции s в рамках магнитотерапевтической процедуры i , p – количество элементов в последовательности, которое также является функцией от s и i .

В итоговом варианте модель сборки интегральной методики выглядит следующим образом

$$M = \bigcup_{i=1}^n \bigcup_{s=1}^{k_i} \{(I_{s,i}^j, \Delta t_{s,i}^j)\} = \{(I_d^j, \Delta t_d^j)\}.$$

Таким образом, сборка интегральной методики представляет собой таблицу определяющую принадлежность пары уровень тока -

длительность тока к конкретному индуктору, где факт принадлежности определяется по местоположению s индуктора d при реализации i -ой методики.

Библиографический список

1. Способ и устройство для проведения групповой магнитотерапии. // Заявка на патент RU 2021104638, приоритет 24.02.2021. / Гуржин С.Г., Жулев В.И., Каплан М.Б.

2. Гуржин С.Г., Жулев В.И., Каплан М.Б. и др. Матричная система магнитотерапии и магнитореабилитации «РелаксМаг» и методика проведения доклинических испытаний // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2019. – Т. 22. № 4. – С. 6–15.

Сведения об авторах

Каплан Михаил Борисович, кандидат технических наук, доцент каф. ИИБМТ, РГРТУ (Рязань). E-mail: mik_kap2001@mail.ru.

УДК -955

Короткова Л.А.

АВТОМАТИЗАЦИЯ РОБОТОТЕХНИКИ В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ

В настоящее время робототехника распространена практически во всех сферах деятельности и производства. Потребность в использовании роботизированной техники обусловлена необходимостью автоматизации производства и повышения за счет этого его объёма.

Ключевые слова: робототехника, робот, искусственный интеллект, роботизированные, системы управления, информационные технологии

Korotkova L.A.

AUTOMATION OF ROBOTICS IN MODERN CONDITIONS

Currently, robotics is common in almost all areas of activity and production. The need for the use of robotic technology is due to the need to automate production and increase its volume due to this.

Keywords: robotics, robot, artificial intelligence, robotic, control systems, information technology.

В условиях развития современной экономики потребность в высоких технико-экономических показателях, характеризующих конкурентоспособность продукции, с каждым днем непрерывно растет. В связи с этим одной из основных промышленных задач является разработка определенной системы мероприятий по повышению уровня технологичности производственных процессов и активному развитию автоматизации и роботизации. 1950-е годы XX века в области техники общества знаменуются всемирно известной научно-технической революцией, которая дала так называемый толчок к началу бурного развития промышленности и, как следствие, мировой экономики в целом. Так, был дан старт массовой автоматизации производства. В современном обществе идет активное внедрение роботов в нашу жизнь. Робототехника является одним из важнейших направлений научно-технического прогресса. Роботы применяются в различных сферах: в промышленности, в медицине, в строительстве, в сельском хозяйстве и животноводстве, в науке и т.д. Очень многие процессы в жизни человек уже и не мыслит без робототехнических устройств. По последним данным, сегодня в мире работают более 1,8 млн. самых различных роботов -промышленных, бытовых, медицинских, роботов-игрушек.

Робототехника – это научная и техническая база для проектирования, производства и применения роботов. Она позволяет использовать на практике теоретические знания по таким предметам, как математика, физика, информатика и т.п. Несомненно, существование электронно-вычислительных машин в современном мире связано с гигантским скачком развития информационных технологий во второй половине XX века, что значительно ускорило и продвинуло разработку робототехнических систем.

Главная задача робототехники – это конструирование и использование роботов и основанных на их применении роботизированных систем любого назначения.

Робот – это своеобразный универсальный аппарат, который осуществляет механические действия, подражая человеку, занимающегося тяжелой физической деятельностью. В структуру робота прежде всего входят устройства манипуляции или механические манипуляторы. Каждый из них снабжён приводами: электрическими, гид-

равлическими или пневматическими. Также присутствует специальный захватывающий механизм или инструмент, средства передвижения, модуль управления приводами и движением, специальные сенсорные датчики, камеры для чувствительности робота во внешней среде и вычислительный модуль. Основными достоинствами роботов являются их универсальность, многофункциональность и быстрая адаптация для решения новых операций. Они освобождают человека от опасной работы, всегда выполняют задания точно и вовремя; могут сделать гораздо больше, чем человек за то же время, они никогда не устают; могут работать в труднодоступных местах, им не нужна пища, отпуск, а только энергия.

Роботы подразделяются по способу контроля на программируемых, адаптивных и интеллектуальных. Машины с программным контролем – это роботы, имеющие жёстко заданный алгоритм, их включают в группу первого поколения.

Второе поколение – с адаптивным контролем, машины умеют контактировать с окружающим миром и воспринимать изменения, работать в непредвиденных ситуациях.

И последние – роботы с интеллектуальным контролем, то есть имеющие искусственный интеллект, - имеют развитую систему восприятия данных, которая позволяет им воспроизводить поведение человека в аналогичных ситуациях

В настоящее время страной-лидером по закупкам промышленных роботов является Китай. В этой стране большое количество роботов занято на производстве, направленном в основном на электронику.

Роботизированное будущее уже наступило. Темпы развития этого направления невероятны. Трудно представить, что будет еще через десяток лет. Уже сейчас невозможно вообразить мир без робототехники, она проникла во все отрасли производства и автоматизировала человеческий труд.

Следовательно, современный человек должен быть мобильным, технически грамотным и готовым к внедрению инноваций в жизнь.

Однако такие изменения повлекли за собой ряд коррективов, включающих в себя расходы на разработку и внедрение технического обеспечения, а также касающихся повышения квалификации рабочих.

Робототехника и прогресс в области создания искусственного интеллекта прорывные инновации, обладающие значительными перспективами и способные радикально изменить экономические и соци-

альные аспекты жизни общества. Исследования, посвященные развитию робототехники, пока немногочисленны. Данная статья восполняет пробел, анализируя создание и распространение инноваций в сфере робототехники и роль интеллектуальной собственности в этом процессе.

Робототехнические кластеры сосредоточены главным образом в США и странах Европы, но в последние годы динамично развиваются также в Корее и Китае. Инновационная экосистема робототехники базируется на кооперационных сетях, объединяющих независимых специалистов, научные организации и компании. Существенную роль в поддержке инновационной деятельности в рассматриваемой сфере играет государство, прежде всего путем грантового финансирования, размещения оборонных заказов и реализации национальных стратегий развития робототехники. Важным стимулом к созданию инноваций являются конкурсы и призы. Патентование используется компаниями для защиты интеллектуальной собственности от посягательства третьих сторон, обеспечения свободы действий, лицензирования технологий и защиты от судебного преследования. Максимальное количество патентных заявок в этой сфере зарегистрировано в Японии, Китае, Корее и США. Примечательна растущая патентная активность университетов и государственных научных организаций, прежде всего в Китае. Лидерство по числу патентных заявок среди секторов экономики традиционно принадлежит автомобилестроению и электронике, но новые игроки появляются, в частности, в таких областях, как медицинские технологии и интернет. Помимо патентования для сохранения права собственности на инновации нередко используются механизмы коммерческой тайны и защиты авторского права, прежде всего в отношении программного обеспечения. Вместе с тем на начальных, доконкурентных стадиях инновационного процесса все активнее развиваются открытые платформы, позволяющие субъектам робототехнической индустрии оптимизировать первоначальные затраты на создание инноваций.

Бурный рост числа патентных заявок приводит к наращиванию объемов работы и загруженности большинства крупнейших патентных ведомств мира. В результате в Европейском патентном ведомстве средний срок от подачи заявки до получения патента составляет около 10 лет, между тем, как, например, в Великобритании менее 50% выданных патентов возобновляются по истечении десятилетнего срока. По оценкам британского исследователя И. Харгривса, каждый

дополнительный год рассмотрения патентных заявок в масштабах мировой экономики ведет к потерям (от замедления инновационной и предпринимательской активности) в сумме 7,6 млрд ф. ст. (свыше 12,5 млрд долл.). Экстраполяция тенденций последних лет позволяет предположить, что в перспективе поток патентных заявок будет возрастать, особенно из таких стран, как КНР (где государством поставлена амбициозная цель удвоить ежегодное число выдаваемых патентов) и Индия. Многие зарубежные обозреватели высказывают озабоченность снижением качества выдаваемых патентов вследствие высокой загрузки экспертов в патентных ведомствах. В свою очередь, наличие патентов низкого качества создает условия для роста числа сомнительных исков о защите прав на интеллектуальную собственность (такое явление получило название «троллинг») во многих патентных юрисдикциях за последние два десятилетия.

По мнению ряда экспертов, расширение патентной защиты на эти области может потенциально препятствовать распространению технологий, оказывая негативное воздействие на инновационную деятельность в сферах, близких к научной деятельности и умственным процессам и традиционно являющихся непатентоспособными. Законодательные акты, судебные решения и практика патентования во многих странах мира в последнее время носят все более ограничительный характер.

Сведения об авторах

Короткова Лариса Александровна, старший преподаватель ТГТУ (Ташкент) E-mail: Korotkova.larisa1967@mail.ru.

УДК 53.088.7

Миловзоров Д.Г., Галиев А.Л., Ахметов Ш.Р.

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ АЛГОРИТМОМ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТРЕХКОМПОНЕНТНОГО ФЕРРОЗОНДОВОГО ГРАДИЕНТОМЕТРА С ВАРЬИРУЕМОЙ БАЗОЙ

В настоящей работе рассматриваются основные факторы и требования к системе управления алгоритмом функционирования

феррозондового градиентометра с варьируемой базой, оказывающие весомый вклад в качественные и эксплуатационные характеристики прибора.

Ключевые слова: феррозондовый градиентометр, варьируемая база, формат кадра, феррозондовые датчики.

Milovzorov D.G., Galiev A.L., Akhmetov Sh.R.

CONTROL SYSTEM FOR THE ALGORITHM OF FUNCTIONING OF A THREE-COMPONENT FLUXGATE GRADIOMETER WITH A VARIABLE BASE

In this paper, the main factors and requirements for the control system of the functioning algorithm of a fluxgate gradiometer with a variable base are considered, which make a significant contribution to the quality and operational characteristics of the device.

Keywords: fluxgate gradiometer, variable base, frame format, fluxgate sensors.

При выполнении дефектоскопии, проводимой с целью выявления дефектов в структуре ферромагнитных материалов или применяемой для обнаружения скрытых в приповерхностных слоях Земли ферромагнитных объектов, широкое применение нашли магнитометрические приборы, реализованные на феррозондовых датчиках. Их низкий порог чувствительности порядка нескольких нТл, простота конструкции, высокое быстродействие сыграли первостепенную роль при выборе этого типа датчиков в магнитометрической аппаратуре, в частности – феррозондовых градиентометрах.

Из всего круга задач градиентометрии наибольший интерес представляет определение локальных неоднородностей сверхслабых магнитных полей в пределах естественных вариаций магнитосферы Земли (порядка 100 нТл).

Система управления алгоритмом функционирования феррозондового градиентометра представляет собой совокупность аппаратных и программных средств, как самого градиентометра, так и внешнего управляющего оборудования, обеспечивающих бесперебойную работу всех узлов устройства для однозначного определения изменения градиента вектора магнитной индукции исследуемого объекта [1-3]. Достоверность результатов измерения по многим критериям зависит от качества организации обмена данными между градиентометром и

внешним управляющим оборудованием. Отсюда следуют требования к обмену данными.

1. Обмен данными между градиентометром и управляющим оборудованием должен удовлетворять следующим параметрам:

- обеспечивать однозначное определение начала передаваемого блока данных (кадра);
- содержать параметры, значения которых можно интерпретировать однозначно и в случае повреждения данных при передаче это может быть выявлено;
- содержать признак конца кадра.

Обмен данными ведется в обе стороны: от градиентометра к устройству управления (результаты измерений) и от устройства управления к градиентометру (команды).

2. Физический уровень передачи данных.

Требования к каналу передачи данных определяются условиями работы абонентов (как градиентометра так и устройства управления). Для минимизации массо-габаритных характеристик требуется использовать шину с минимальным количеством линий. Таким свойством обладают последовательные интерфейсы типа RS232, RS485, I2C, SPI, CAN и т. п. Расстояние между абонентами шины на данном этапе не определено и может определяться исходя из здравого смысла: двигатели и иное оборудование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА или какого либо другого носителя или управляющего устройства) могут вносить искажения в обследуемое магнитное поле, соответственно требуется обеспечить некоторое расстояние между БПЛА и градиентометром, возможно порядка 10 метров. Исходя из этого предположения шины I2C, SPI и подобные исключаются, так как не могут обеспечить необходимую дальность связи. Наличие в микроконтроллерах аппаратной поддержки UART позволяет относительно несложно реализовать обмен данными через RS232 или RS485, обладающие нужными характеристиками. Так же возможна работа через UART-Bluetooth модуль типа JDY-08 или HC-05, что позволит передавать данные по радиоканалу. RS232 имеет проверку целостности передачи в виде контроля четности, что позволяет определить поврежденный при передаче кадр. Канал полнодуплексный.

Для корректного обмена данных должен быть разработан соответствующий формат кадра.

3. Формат кадра.

Содержимое кадра, в котором передаются данные, определяется тем, кто его отправил. Так устройство управления отправляет кадры, начинающиеся с латинских букв CMD за которым следует номер команды и, при необходимости, параметры. Команды для градиентометров с постоянной базой, приведены в таблице 1.

Таблица 1. Команды градиентометра с постоянной базой

CMD0	Прекращение работы: остановка тактирования феррозондовых датчиков, остановка преобразования АЦП, прекращение передачи данных преобразования, прекращение записи данных преобразования на съемный носитель.
CMD1	Начало работы: запуск тактирования феррозондовых датчиков, запуск преобразования АЦП, передача данных преобразования, запись данных преобразования на съемный носитель.
CMD2 ABC	Установка коэффициента усиления операционного усилителя перед АЦП, где ABC – число от 0 до 255

Подобный формат, расширенный с учетом требований градиентометра с варьiruемой базой так же можно использовать в разработке. Достоинства подобного формата команд в том, что в таком случае устройство управления можно реализовать на практически любом микроконтроллере, в результате чего отпадает необходимость в использовании ПК или ноутбука, имеющих большую массу. Устройство управления можно сделать компактным.

Формат данных, передаваемых градиентометром для устройства управления так же предполагается сделать текстовым. Преимущество текстового формата перед бинарным – ограничение на количество используемых символов, что позволяет определить повреждения кадров, содержащих недопустимые символы.

Формат кадра передаваемых данных и сохраняемых данных на SD карте представлен на рис. 1.

Начало кадра	Текущее время	Координаты	3 проекции ТФП1	3 проекции ТФП2	3 проекции ТФП3	Активный ТФП	3 проекции Г/А/Д	Температура	Напряжение батареи	Окончание кадра

Рис.1. Формат кадра передаваемых данных и сохраняемых данных на SD карте

Кадр, передаваемый градиентометром с постоянной базой, состоял из строки с фиксированным количеством полей вида:

- первое поле для символа ASCII код 0x99 и служит признаком начала кадра;
- следующее за ними поле – время, полученное с GPS/GLONASS приемника, которое служит для последующего определения времени работы градиентометра при камеральном анализе данных;
- следующее поле отражает координаты места проведения исследования;
- следующие три группы по три поля – значения кодов АЦП измеряемых проекций вектора индукции магнитного поля трехкомпонентных феррозондовых преобразователей (ТФП) по осям X, Y, Z соответственно (ТФП1, ТФП2, ТФП3);
- поле, содержащее номер активной группы ТФП;
- группа из трех полей – значения кодов АЦП измеряемых проекций вектора ускорения свободного падения трехкомпонентного акселерометрического преобразователя (ТАП) по осям X, Y, Z соответственно, предназначенные для программной коррекции угла наклона градиентометра;
- поле, содержащее текущую температуру внутри корпуса градиентометра;
- последнее поле – значение кода АЦП напряжения батареи, встроенной в градиентометр;
- при передаче данных с включенным режимом записи добавляется статус записи на SD карту: WriteOK;
- кадр заканчивается символами перевода строки с ASCII кодами 0x0D и 0x0A, представленные здесь в виде символов.

Таким образом, конец кадра представлен явно, и в устройствах и программном обеспечении (ПО), способных отобразить на экране принятые через RS-232 данные значения, приведут к тому, что следующий кадр будет выведен на следующей строке.

Окончательный формат кадра определяется на этапе сопряжения градиентометра с переменной базой с устройством управления, в соответствии с требованиями автономного устройства, контролирующего полет БПЛА и ПО для проведения камеральной проверки данных.

Достоверность результатов измерений зависит также от качества элементов памяти, т.е. от системы хранения.

4. Хранение данных.

С целью сохранения информации, полученной с АЦП феррозондовых датчиков в предыдущих градиентометрах использовалась карта памяти формата microSD. Данный вид ПЗУ обладает характеристиками, вполне приемлемыми для ее применения в составе градиентометра.

Электрический и логический интерфейсы данного вида ПЗУ позволяют подключить ее с использованием интерфейса SDIO, аппаратная реализация которого имеется в составе микроконтроллера, управляющего работой градиентометра, что снижает время, требуемое для ее подключения и использования. Так же это снижает нагрузку на вычислительное ядро, т.к. работу с данной памятью выполняет специализированный модуль в составе микроконтроллера. Стандартом определена скорость обмена данными в 400 тысяч транзакций в секунду, минимально необходимое количество проводников в шине равно 3 для побитовой передачи, однако имеется возможность увеличения ширины шины данных до 4 бит.

Данный вид ПЗУ имеет стандартизированную форму и краевой разъем, позволяющий подключить ее к широкому спектру оборудования, в том числе и ПК, что избавляет от необходимости разработки устройства-переходника. Используя файловую систему FAT32, де-факто поддерживаемую практически всеми операционными системами, обеспечивается возможность чтения полученных данных с целью камеральной обработки без дополнительного оборудования. Ограничение файловой системы на размер файла в 4 Гб является несущественным, т. к. требуемый объем памяти на запись одного кадра составляет 68 байт для градиентометра с фиксированной базой. Размер кадра для градиентометра с переменной базой увеличится незначительно и по предварительной оценке не превысит 100 байт на кадр, что позволит записать максимально около 40 миллионов кадров на файл. При 10 кадрах в секунду максимальное время непрерывной работы градиентометра для достижения ограничения в 4 Гб на файл превысит 460 суток.

Формат записи кадров в файл ПЗУ совпадает с форматом, передаваемым по каналу связи для уменьшения нагрузки на вычислительное ядро микроконтроллера градиентометра.

При передаче команды записи на microSD карту с ПК передается текущее время, из которого формируется имя записываемого файла, например, 12_25.txt.

5. Феррозондовые датчики и управление ими.

В градиентометре с варьлируемой базой осуществляется управление работой феррозондовых датчиков по заданному техническими условиями алгоритму работы прибора.

Блок феррозондовых датчиков включает в себя три трехкомпонентных преобразователя, два из которых подключаются к схеме с помощью аналоговых ключей. Один канал нижнего датчика имеет постоянную структуру и работает постоянно. С помощью двух подключаемых трехкомпонентных датчиков происходит изменение базы градиентометра.

Блок феррозондовых датчиков может работать в двух режимах: режим 1 – когда к схеме подключен один трехкомпонентный датчик и база градиентометра остается постоянной; режим 2 – когда датчики подключаются попеременно, что позволяет проводить измерения на двух базах градиентометра. Однако, режим 2 оказывается менее быстроедействующим, поскольку после коммутации датчика к схеме происходит скачкообразное изменение сигналов и необходимо дожидаться окончания переходных процессов.

База градиентометра может изменяться оперативно в процессе проведения измерений без остановки процесса. Для реализации данной возможности было разработано меню управления параметрами градиентометра в сервисной программе, представленное на рис. 2.

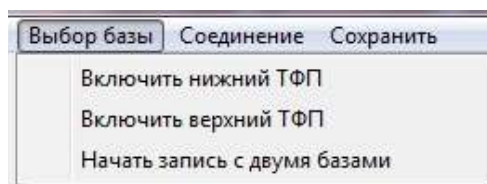


Рис. 2. Меню управления параметрами градиентометра

Текущее состояние базы градиентометра отображается на поле сервисной программы (рис. 3): up – большая база при подключении самого верхнего трехкомпонентного преобразователя, dwn – малая база при подключении среднего трехкомпонентного преобразователя. Пользователь имеет возможность оценивать изменение сигналов с

градиентометра и в зависимости от ситуации оперативно изменить базу.



Рис. 3. Фрагмент сервисной программы

Коммутация каналов осуществляется с помощью четырехканального аналогового ключа ADG1634BRUZ (рис. 4). Для управления переключением используются 3 сигнала: SW1, SW2 и SW3. Данные управляющие сигналы позволяют переключать отдельно 3 канала феррозондовых преобразователей двух трехкомпонентных преобразователей, расположенных по осям X, Y и Z. Особенностью раздельного управления процессом коммутации является необходимость одновременного переключения сразу всех трех датчиков для исключения ситуации функционирования неполного трехкомпонентного преобразователя.

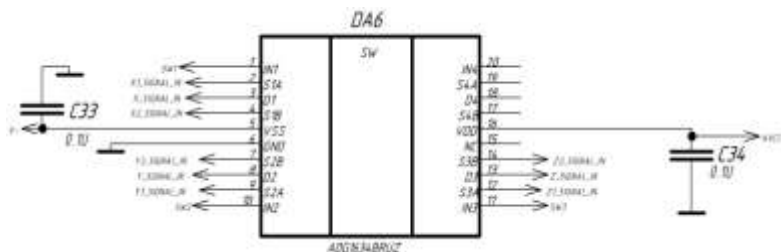


Рис. 4. Схема коммутации каналов

Аналоговый ключ ADG1634BRUZ характеризуется малым сопротивлением канала во включенном состоянии (4,5 Ом) и малым временем переключения (max 100 нс), что позволяет осуществлять

быстрое переключение без введения дополнительных погрешностей измерений.

Экспериментальные исследования разработанного блока феррозондовых датчиков показали, что измерения со всеми включенными датчиками производятся со скоростью 5 измерений в секунду, а в случае фиксированной базы скорость измерений составляет 10 измерений в секунду. Основным элементом, ограничивающим скорость измерения, является сигма-дельта АЦП AD7734, осуществляющий фильтрацию сигнала с помощью встроенного цифрового фильтра с подавлением частот 50/60 Гц.

Также экспериментальные исследования показали, что измерения со всеми включенными датчиками происходят с незначительным искажением действительной картины за счет видоизменения формы сигнала при изменяющейся нагрузке генератора возбуждения феррозондов.

Отсюда очевидны выводы о необходимости внесения изменений в схему коммутации каналов с применением более мощного генератора и блока питания прибора.

Библиографический список

1. Щербаков Т.Н., Анцелевич М.А., Удинцов Д.Н. О предельной глубине обнаружения локальных ферромагнитных объектов в толще полупроводящей среды. Электротехника, № 6, 2005. С. 48-52.
2. Звездинский С.С., Парфенцев И.В. Магнитометрические феррозондовые градиентометры для поиска взрывоопасных предметов // Спецтехника и связь. М, 2009. № 1. С.16-29.
3. Зверев А.С., Кириаков В.Х., Любимов В.В. Градиентометры для исследования магнитного поля в различных условиях и средах // Экономика и производство. /Технологии, оборудование, материалы / Журнал организаторов производства. М., 2004. № 3. С. 59-60.

Сведения об авторах

Галиев Анвар Лутфрахманович, доктор технических наук, профессор СФ БашГУ (Стерлитамак). E-mail: galievanvar@mail.ru.

Миловзоров Дмитрий Георгиевич, кандидат технических наук, доцент кафедры информационно-измерительной техники УГАТУ (Уфа). E-mail: dgmilovzorov@yandex.ru.

Ахметов Шамиль Рамилевич, инженер кафедры ОиТФ СФ БашГУ.

Минеев А.В., Ясовеев В.Х.

СТРУКТУРА ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ РАДИАЛЬНЫХ ЗАЗОРОВ

Проанализирована структура погрешностей измерения радиальных зазоров волоконно-оптическим преобразователем и выявлены основные составляющие суммарной погрешности. На основе полученных экспериментальных результатов оценена методическая погрешность, волоконно-оптического преобразователя, обусловленная изменением оптических и диффузионных свойств рабочих лопаток.

Ключевые слова: волоконно-оптический преобразователь, радиальный зазор, рабочая лопатка, погрешность измерения.

Mineev A.V., Yasoveev V.Kh.

STRUCTURE OF ERRORS OF MEASUREMENT OF A FIBER OPTICAL CONVERTER OF TIP CLEARANCE

The structure of errors in measuring the radial clearances by a fiber-optic converter is analyzed and the main components of the total error are identified. On the basis of the obtained experimental results, the methodical error of the fiber-optic converter, caused by the change in the optical and diffusion properties of the rotor blades, is estimated.

In Keywords: fiber optic converter, radial clearance, rotor blade, measurement error.

Введение

Известен метод измерения радиальных зазоров (РЗ) между торцами рабочих лопаток (РЛ) ротора и внутренней стенкой статора авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) [1-6]. Концепция построения данных измерительных систем базируется на логотрическом методе измерения с применением разветвленных волоконно-оптических коллекторов. Результаты исследований измерений РЗ с использованием разветвленного волоконно-оптического коллектора (ВОК) отражены в работах отечественных и зарубежных специалистов. Наиболее обширные исследования проведены научных исследовательских центрах в Европейских странах и в КНР. В ходе прове-

денных испытаний на ступени компрессора низкого давления была подтверждена жизнеспособность данной аппаратуры с применением разветвленных ВОК. Получены удовлетворительные результаты измерений (суммарная погрешность измерения оценивается на уровне – 12 мкм в диапазоне от 0-5 мм, а разрешающая способность – на уровне 0,01 мм).

Результаты проведенных нами расчетных исследований лабораторных экспериментов [7,8] схожи с результатами исследований, проводимыми за рубежом и подтверждают перспективность дальнейших исследований, разработок оптико-электронной аппаратуры.

В вышеперечисленных работах, а также в других опубликованных работах по данной тематике приведены результаты лабораторных и натурных стендовых исследований, однако отсутствуют какие-либо сведения о вычислении погрешностей измерения РЗ. Поэтому целью настоящей работы является определение структуры погрешностей измерения волоконно-оптического преобразователя (ВОП) РЗ.

Структура погрешностей измерения ВОП РЗ

Одними из важнейших показателей, характеризующих качество разработанного измерительного прибора являются его метрологические характеристики. Согласно ГОСТ 12263 средство измерения определяется как техническое средство, используемое для измерения искомой величины и имеющее нормированные метрологические характеристики. По месту возникновения в эксперименте погрешности подразделяются на:

- методические;
- инструментальные;
- случайные [9,10].

Методическим погрешностям ВОП обусловлены ограничениями и допущениями, которые вводятся при разработки математической и аналитической моделей функции преобразования.

Инструментальные погрешности измерения ВОП обусловлены технологическими допусками и отклонениями конструктивных элементов ВОП: механических, оптических и электронных.

Случайные погрешности измерения вызваны, главным образом, внешними воздействующими факторами: изменения внешних климатических условий, механические и электромагнитные помехи и т.д.

Таким образом, для определения общей относительной погрешности ВОП радиальных перемещений необходимо провести метрологическую оценку каждого слагаемого компонента.

Метрологическая оценка методической погрешности ВОП вызванная изменением оптических свойств РЛ

Методические погрешности измерений закладываются исследователем, проводящим эксперимент, на стадии планирования эксперимента. Данные погрешности определяются несовершенством выбранной математической модели объекта измерения, влиянием средства измерения на объект. Иными словами, методическая погрешность измерения характеризует несовершенство выбранной методики измерения.

В работах [7, 11] изложены описание и результаты экспериментальных исследований, проведенных с целью оценки влияния изменения оптических свойств РЛ на характер функции преобразования ВОП. Изменение оптических свойств поверхности РЛ на всех этапах жизненного цикла обусловлено экстремальными условиями эксплуатации (воздействия продуктов сгорания, механические и температурные напряжения, нарушение защитного покрытия и т.д.).

Применим полученные экспериментальные данные для метрологической оценки методической погрешности ВОП, вызванной изменением оптических свойств РЛ. На рис.2 приведены зависимости функций преобразования ВОП $\Phi_2/\Phi_1 - f(\delta)$ (где Φ_2, Φ_1 – потоки оптического излучения во втором и первом приемных каналах ВОК соответственно, δ – значение РЗ) при различных оптических свойствах РЛ:

- 1 – РЛ без фактической наработки с высокими отражающими свойствами (а) рис.1);
- 2 – РЛ с нарушением защитного покрытия, покрытая продуктами сгорания (б) рис.2);
- 3 – РЛ с искусственно «затемненной» поверхностью с низкими отражающими свойствами (в) рис.3).

Изменение характера полученных функций преобразования ВОП обусловлен перераспределением интенсивности излучения в отраженном пучке излучения в результате изменения оптических и диффузионных свойств РЛ.

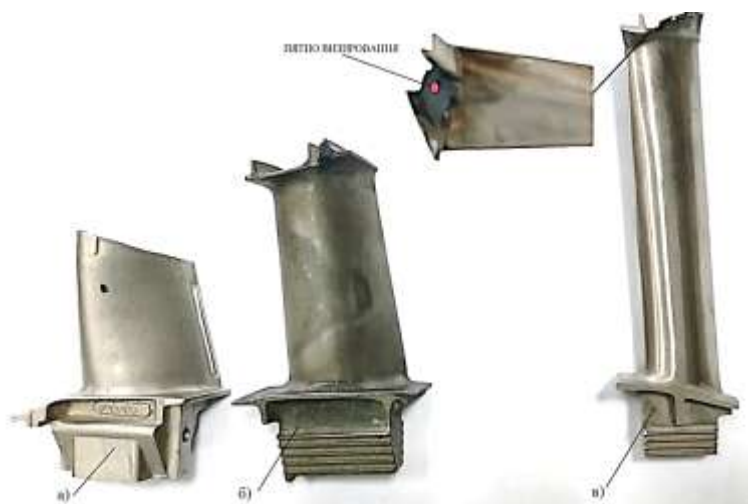


Рис.1. РЛ с различными оптическими свойствами

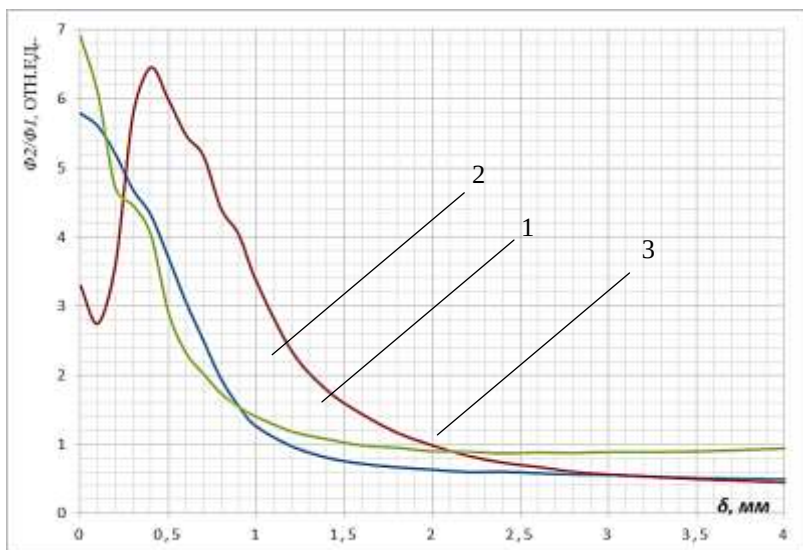


Рис.2. Функции преобразования ВОП в зависимости от оптических свойств КО

Таким образом суммарная методическая ВОП погрешность, обусловленная изменением оптических и диффузионных свойств РЛ в диапазоне от 0 до 4 мм составляет 3,2%.

Выводы

1. Определена структура погрешностей ВОП РЗ РЛ ГТД, основными компонентами погрешности вычисления РЗ преобразователя являются методические, инструментальные и случайные погрешности.

2. На базе ранее проведенных экспериментальных исследований оценена методическая погрешность ВОП, обусловленная изменением оптических и диффузионных свойств РЛ в диапазоне от 0 до 4 мм (3,2%).

Библиографический список

1. I. García, “Desarrollo de un sensor de fibra optica para la medida del tip clearance y tip timing en motores aeronauticos,” PhD Thesis (Univ. del Pais Vasco Euskal Herriko Unibertsitatea, Bilbao, 2017).

2. J. Zhao. Study on an Intelligent Optical Fibre Displacement Sensor / Jianping Zhao, Xiaodong Zhang, Yang Wang // Processing Engineering 15. 2011. 989-993 p.

3. Lei H., Binghui J. An optical fiber measurement system for blade tip clearance of engine // Intern. Journ. Aerospace Engineering. 2017. 4168150.

4. Иванов С.В. Разработка и исследование макетного образца безлинзового термостойкого оптоволоконного зонда для измерения зазоров у концов рабочих лопаток / С.В. Иванов // Основные результаты научно-технической деятельности ЦИАМ (2009-2010 гг.) / Под общей редакцией В.А. Скибин, В.И. Солонина, О.С. Гуревича. – М., ЦИАМ, 2010. – С. 739-742.

5. Минеев А.В., Ясовеев В.Х. Анализ средств измерения радиальных зазоров по аспекту метрологического обеспечения // САПР и моделирование в современной электронике. – Брянск, 2018. С. 183 – 189.

6. Минеев А.В., Ясовеев В.Х. Вопросы измерения радиальных зазоров авиационных двигателей // Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации: материалы Международной научно-технической конференции «Шлядинские чтения-2018» / Издательство ПГУ – г. Пенза, 2018. С. 55-58.

7. Mineev A.V., Yasoveev V.Kh. Analysys of the influence of turbines blades tips optical properties for the results of the measurements of radial displacement by logo method using a multichannel fiber optical collector // 2019 International Conference on Electrotechnical Complexes and

Systems: conference program of International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems. Ufa State Aviation Technical University. – Ufa: publishing complex USATU, 2019. 276-280 pp.

8. Минеев А.В., Ясоев В.Х. Аналитическая модель измерительного оптико-электронного зонда малых аксиальных перемещений // Автометрия. – Новосибирск, 2021. Т. 57. № 1. С. 80-92.

9. Жуков В.К. Теория погрешностей технических измерений: учебное пособие / Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009 – 180 с.

10. ГОСТ 8.009. Нормируемые метрологические характеристики средств измерения – Введ. 28.05.1985 г. – Москва: ФГУП «Стандартинформ», 1985. – 27 с.

11. Минеев А.В., Ясоев В.Х. Измерение малых аксиальных перемещений объектов со сложной геометрией и различными оптическими свойствами с применением волоконно-оптических коллекторов // Актуальные проблемы науки и образования в современном вузе: Сборник трудов IV Междунар. науч.-технич. конф. (г. Стерлитамак, 23–25 мая 2019 г.). Т. I. Уфа: РИЦ БашГУ. С. 435–440.

Сведения об авторах

Минеев Александр Владимирович, инженер-разработчик АО УНПП «Молния», г. Уфа, E-mail: alexxx.vladimirovich@mail.ru.

Ясоев Васих Хаматович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Информационно-измерительной техники ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», г. Уфа, E-mail: yasov@mail.ru.

УДК 534–8; 66.084; 628.3

Муллакаев Р.М.

ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗРАБОТАННОГО МОБИЛЬНОГО СОНОХИМИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

На основе малогабаритного оборудования и высокоэффективных технологий разработан мобильный сонохимический комплекс для очистки сточных вод. Основой аппаратно-технологической схемы разработанного комплекса является применение комбинированных

физико-химических методов. Внедрение комплекса позволит значительно сократить капитальные и эксплуатационные затраты при очистке производственных стоков.

Ключевые слова: мобильный сонохимический комплекс, ультразвук, химические реагенты, флотационная очистка, гальванокоагуляционная очистка, ультрафиолетовая стерилизация, комплексная технология

Mullakaev R.M.

WASTEWATER PURIFICATION USING THE DEVELOPED MOBILE SONOCHEMICAL COMPLEX

A mobile sonochemical complex for wastewater treatment based on small-sized equipment and highly effective technologies was developed. The hardware-technological scheme of the developed complex is based on the use of combined physico-chemical methods. The implementation of the complex will significantly reduce the capital and operating costs for the treatment of industrial effluents.

Keywords: mobile sonochemical complex, ultrasound, chemical reagents, flotation treatment, galvanocoagulation cleaning, ultraviolet sterilization, complex technology.

Актуальной экологической задачей в химической, нефтедобывающей и нефтеперерабатывающей отраслях промышленности является обеспечение высокой степени очистки сточных вод. По результатам анализа литературных данных для очистки сточных вод эффективно применение комбинированных физико-химических методов.

Данная статья посвящена разработке и испытанию мобильного сонохимического комплекса очистки сточных вод с использованием современного компактного оборудования и комбинированных технологий, обеспечивающий повышение эффективности очистки сточных вод и сокращение капитальных и эксплуатационных затрат.

Основа комплекса – разработанные комбинированные технологии, основанные на интенсификации физико-химических процессов при ультразвуковой (УЗ) обработке различных сред в низкочастотном ультразвуковом диапазоне (15...100 кГц) [1–3].

При разработке мобильного сонохимического комплекса использованы результаты научных и опытно-конструкторских работ в об-

ласти очистки сточных вод с применением УЗ-воздействия, а также технологии, прошедшие опытно-промышленные испытания.

В процессе разработки комплекса были решены следующие задачи:

- определены механизмы УЗ-воздействия на жидкие дисперсные системы (модели реальных производственных стоков);
- отработаны рациональные режимные и технологические параметры очистки сточных вод на лабораторных установках и экспериментальных стендах;
- проведено масштабирование процессов при разработке опытно-промышленной установки (на основе лабораторных и стендовых экспериментов), отработаны режимные и технологические параметры процесса очистки загрязненных вод в укрупнённом масштабе;
- проведены опытно-промышленные испытания оборудования и технологий очистки сточных вод различных составов на реальных предприятиях;
- подготовлены конструкторские документы, технологические документы, программы для ЭВМ.

В состав разработанного комплекса (рис. 1) вошли автономные блоки (смонтированные в отдельных контейнерах): блок отделения механических примесей (ОМП); блок реагентно-флотационной очистки (РФО); блок гальванокоагуляционной обработки (ГКО); блок ультрафиолетовой стерилизации (УФС).

Блок отделения механических примесей предназначен для удаления из сточных вод механических примесей (концентрацией не более 20...30 %) известными способами с учетом особенностей объекта очистки.

Загрязненные воды насосами подаются на осадительную шнековую центрифугу, затем подаются в гидроциклон с использованием насосного блока. Далее водный поток с дисперсными включениями небольшой концентрации поступает в сепаратор, в котором от эмульсии отделяются тонкодисперсные примеси. Образующийся осадок после обезвоживания направляется на утилизацию.

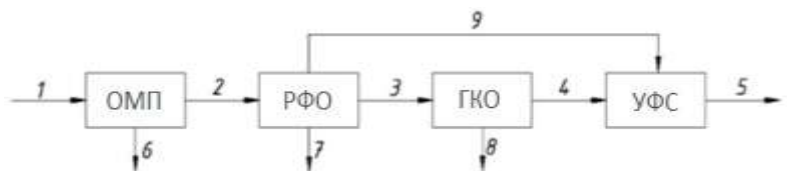


Рис. 1. Блок-схема мобильного сонохимического комплекса очистки сточных вод:

1 – исходная сточная вода; 2 – вода после блока ОМП на флотационную очистку; 3 – вода после блока РФО на гальванокоагуляционную очистку; 4 – вода после блока ГКО на обеззараживание; 9 – вода после блока РФО на обеззараживание; 5 – вода после обеззараживания; 6 – осадок на утилизацию; 7 – осадок после очистки на блоке РФО; 8 – отработанный гальванокоагулянт

Блок реагентно-флотационной очистки воды предназначен для удаления из сточных вод коллоидных загрязнений, углеводов, мелкодисперсных взвесей методом реагентной флотации с использованием УЗ-воздействия [4], различных реагентов (коагулянтов и флокулянтов).

На промышленной площадке предприятия «Эмульсионные технологии» (г. Самара) проведены опытно-промышленные испытания (ОПИ) блока РФО при очистке нефтезагрязненных вод предприятия Приволжского филиала ООО «ЛУКОЙЛ-Уралнефтепродукт».

Режимные и технологические параметры процесса очистки:

- продолжительность ультразвуковой активации реагента АКФК (на основе нефелина) – 2 мин, продолжительность флотации – 12 мин;
- продолжительность ультразвуковой активации реагента «Праестол» – 10 мин, продолжительность флотации – 12 мин;
- при совместном использовании реагентов АКФК и «Праестол» продолжительность флотации – 7 мин.

Результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты очистки загрязненных вод методом флотации (дозировка реагента АКФК – 20 мг/л (по Al_2O_3); дозировка реагента «Праестол» – 4 мг/л)

Нефтезагряз- ненные воды	C ₀ , мг/л	Марка реагента	C, мг/л	η, %
Модельная смесь	445	«Праестол»	14,9	96,7
		АКФК	13,2	97,0
		АКФК, «Праестол»	10,1	97,7
Поверхностный сток	43,7	«Праестол»	8,5	80,5
		АКФК	7,5	82,8
		АКФК, «Праестол»	2,1	95,2
Примечание: C ₀ – исходная концентрация нефтепродуктов, мг/л; C – конечная концентрация нефтепродуктов, мг/л; η – степень очистки, %;				

Эксперименты показали эффективность УЗ воздействия при совместном использовании «АКФК» и флокулянта «Праестол» 857», что особенно эффективно при очистке поверхностных стоков, когда степень очистки возрастает на 15–18 %. Кроме того, предварительная УЗ-активация реагентов позволила заметно уменьшить расход реагентов.

Блок гальванокоагуляционной обработки воды предназначен для очистки сточных вод от тяжелых металлов, а также от нефтепродуктов и от других органических загрязнений методом гальванокоагуляции с применением УЗ-воздействия [5–8].

Для очистки сточных вод от загрязнений используется реагент – суспензия оксидов железа (в основном магнетита Fe_3O_4), которая нарабатывается в гальванокоагуляторе. Далее суспензия магнетита подается в ультразвуковой реактор (где происходит активация магнетита за счёт диспергирования частиц). Продолжительность УЗ-обработки магнетита регулируется скоростью циркуляции суспензии в замкнутом контуре, состоящем из скрапуловителя и насосов. Очистка сточных вод от загрязнений проводится в реакторе и основным механизмом очистки сточных вод является сорбция загрязнений на частицах магнетита. Очищенные воды из реактора подаются на рамный фильтр-пресс для удаления твердых включений. Интенсификация процесса в реакторе обеспечивается барботированием сжатым воздухом, а также примене-

нием циркуляционного контура (включающего гидроциклон, систему регулировочных клапанов, блок насосов).

Таблица 2. Результаты очистки сточных вод блоком ГКО с применением УЗ-воздействия

Загрязнения	Концентрация загрязнений, мг/л			Степень очистки, %
	до очистки	ПДК	после очистки	
Взвешенные	180	18	7	96
Нефтепродукты	420,0	0,7	37,4	91
Марганец	2,10	0,10	0,08	96
Железо	6,30	1,10	0,27	96
Цинк	0,60	0,10	0,02	66
Медь	1,10	0,04	0,01	88
pH	7...9	7,0	6,5	—

Результаты опытно-промышленных испытаний блока ГКО (при очистке загрязненных вод участка мойки железнодорожного транспорта Санкт-Петербургского метрополитена) представлены в табл. 2.

В результате установлена целесообразность и эффективность предварительной УЗ-обработки гальванокоагулянта при реализации процесса очистки сточных вод от тяжелых металлов и нефтепродуктов позволяющая на 20–25 % сократить длительность процесса и повысить на 10–15 % степень очистки.

Блок ультрафиолетовой стерилизации вод предназначен для обеззараживания сточных вод на следующей стадии очистки с использованием ультразвуковой обработки и ультрафиолетового (УФ) излучения [9].

Вода после блоков РФО и ГКО подается насосами на стерилизацию воздействием ультрафиолетового и ультразвукового полей. Ультразвуковое поле создается с применением гидродинамических излучателей (обеспечивающих режим развитой кавитации) и волновода, соединенного с двумя магнитострикционными преобразователями (питание – от УЗ-генератора). Двумя лампами УФ-излучения, расположенными в пенале, обеспечиваются импульсный режим и интенсивность излучения, необходимые для стерилизации воды.

Исследования эффективности стерилизации сточных вод комбинированным воздействием ультразвука и УФ-излучения проведены на

клетках суточных культур грамотрицательных палочковидных бактерий *Escherichia coli* (*E. coli*) и грамположительных кокков *Sarcina lutea* (*S. lutea*) [10].

Клетки *E. coli* и *S. Lutea* были суспензированы в водопроводной воде, которая предварительно подвергалась стерилизации при температуре 120 °С и давлении 1 атм. В порцию воды объемом 0,5 л вносили 20 мл бактериальной суспензии, содержащей примерно $5 \cdot 10^9$ клеток. В тот же день методом точечных высевов для отобранных проб были произведены микробиологические посевы в чашках Петри на среду МПА (мясопептонный агар). Аналогичный микробиологический посев был проведён через сутки для проб, подвергнутых УФ-и УЗ-обработке, для выявления «отделённого» эффекта воздействия. Образовавшиеся колонии микроорганизмов регистрировались после каждого посева для *E. coli* – через 15...20 ч, для *S. lutea* – через 30...40 ч. Далее по числу образовавшихся колоний определялось число жизнеспособных клеток или колониеобразующих единиц (КОЕ) данного вида микроорганизмов в 1 мл пробы воды, из которой производился посев.

Как показали эксперименты при увеличении времени УЗ-обработки суспензии, содержащей клетки *E. coli*, уменьшается численность КОЕ в суспензии. После УЗ-обработки в течение 20 с утрачена видимая жизнеспособность примерно 20 % клеток *E. coli*, после УЗ-обработки в течение 60 с – примерно 50...60 % клеток. Через сутки жизнеспособность *E. coli* в опытах с воздействием ультразвука в течение 20 и 40 с была на том же уровне, что и в контрольных экспериментах, и только в опыте с УЗ-воздействием в течение 60 с установлен отдаленный результат – численность КОЕ составила ~60 % от наблюдаемой в контрольных экспериментах (без УЗ-воздействия).

При исследованиях воздействия ультразвука на воду, содержащую клетки *S. lutea*, установлено увеличение численности КОЕ по мере увеличения продолжительности УЗ-обработки. После УЗ-обработки в течение 60 с численность КОЕ *S. lutea* составила примерно 400 % от наблюдаемой в контрольных экспериментах. Механизм УЗ-воздействия на колонии бактерий *S. Lutea* предположительно следующий. В природном или лабораторном местообитании клетки *S. Lutea* стабильно существуют в микрогруппах из четырёх клеток. При УЗ-обработке эти микрогруппы распадаются на отдельные клетки, которые при этом остаются жизнеспособными, что объясняет 4-кратное увеличение численности КОЕ после УЗ-обработки в течение

ние 60 с. Примерно через сутки численность КОЕ в обработанных суспензиях и в суспензии без обработки (в контрольных экспериментах) выравнивается.

Экспериментами с использованием УФ-обработки колоний бактерий *E. coli* и *S. Lutea* установлено: численность КОЕ микроорганизмов через сутки возрастает по сравнению с контрольными экспериментами, причем в случае *E. coli* – возрастает на большую величину, чем в случае *S. Lutea*. Следовательно, УФ-обработка (с небольшой интенсивностью) колоний бактерий обоих видов стимулирует жизне-способность бактериальных клеток.

Наиболее эффективна совместная обработка ультразвуком и ультрафиолетовым излучением водной среды, содержащей микроорганизмы *Escherichia coli* и *Sarcina lutea*: численность КОЕ микроорганизмов, уменьшается в 10 раз и более по сравнению с контрольными экспериментами без УЗ-и УФ-воздействия.

Мобильный сонохимический комплекс очистки сточных вод

Схема разработанного комплекса приведена на рис. 2 [11–12].

Загрязненные воды направляются на осадительную шнековую центрифугу 1 (см. рис. 2) и затем – на гидроциклон 3 с использованием насосного блока 2. Далее водный поток с дисперсными включениями небольшой концентрации направляется на сепаратор 4, в котором от эмульсии отделяются механические примеси.

Вода после отделения механических примесей направляется на флотационную очистку в камеру 5. Одновременно насосным блоком в загрязненный поток воды вводится реагент из емкости 3, предварительно активированный на ультразвуковой установке 4.

Если после флотационной очистки нет соответствия нормативам по содержанию в воде тяжелых металлов и органических загрязнений, то вода направляется в блок ГКО, если есть соответствие, то вода подается напрямую в блок ультрафиолетовой стерилизации.

При необходимости удаления тяжелых металлов и органических примесей вода из блока флотационной очистки поступает в реакционную камеру 9 блока ГКО (см. рис. 2), в которой происходит сорбция загрязнений на частицах магнетита. Суспензия магнетита нарабатывается в гальванокоагуляторе 6 и после скрапоуловителя направляется в блок ультразвуковой активации гальванокоагулянта 8 и далее – в реактор 9. После гальванокоагуляционной очистки вода подаётся на фильтр 11 для очистки от мелкодисперсных включений магнетита, оставшихся после разделения суспензии в гидроциклоне 10.

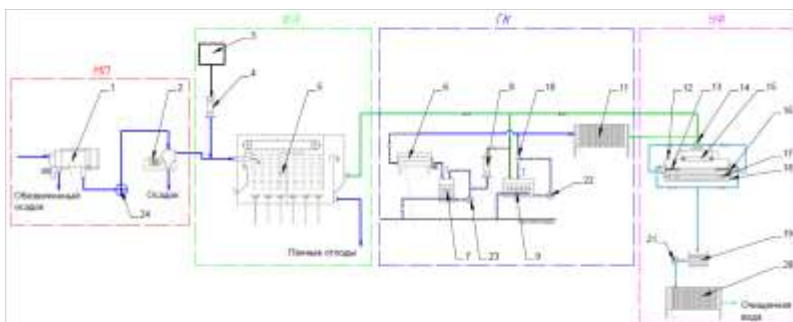


Рис. 2. Аппаратурно-технологическая схема мобильного сонохимического комплекса очистки сточных вод:

1 – центрифуга; 2 – тарельчатый сепаратор; 3 – ёмкость химического реагента; 4 – установка ультразвуковой активации реагента; 5 – флотатор; 6 – гальванокоагулятор; 7 – скрапоуловитель; 8 – блок ультразвуковой УЗ-активации магнетита; 9 – реактор; 10 – гидроциклон; 11 – фильтр; 12 – кожух; 13 – лоток; 14 – насос высокого давления; 15 – ультрафиолетовая лампа; 16 – гидродинамический излучатель; 17 – ультразвуковой излучатель; 18 – пенал; 19 – промежуточная ёмкость; 20 – фильтр-пресс; 21, 22, 23, 24 – насосные блоки

Стерилизация воды проводится при совместной обработке в УФ- и УЗ-полях. Источник УФ-поля – две лампы 15, расположенные в пенале, источник УЗ поля – гидродинамические излучатели 16 и волноводно-излучающая система 17. Окончательное фильтрование воды производится в фильтр-прессе 20.

Комплекс спроектирован для работы в полевых условиях в контейнерном варианте и может быть применен для решения широкого спектра экологических задач промышленных предприятий.

Эксплуатационные достоинства разработанных контейнерных модулей:

- адаптация контейнерных модулей под технологические цепочки в полевых условиях нефтедобывающих предприятий;
- компактность аппаратного оформления (минимум затрат при пуско-наладочных работах на местах эксплуатации комплекса);
- полная автоматизация процессов управления и контроля комплекса для обеспечения наиболее рациональных режимов работы с учетом энергосбережения и ресурсосбережения (сокращения расхода

реагентов, уменьшения доли твердых отходов, повторного использования воды для технологических и хозяйственных нужд);

- универсальность очистки стоков независимо от состава и концентрации загрязняющих веществ, дисперсности, фазового состояния и других факторов;

- единой системой управления комплексом обеспечиваются следующие функции: управление технологическим оборудованием; сбор и наглядное отображение информации о технологических параметрах работы комплекса; контроль и диагностика технического состояния оборудования, в том числе звуковая и цветовая сигнализация в нестандартных ситуациях.

Разработаны техническая документация и технологический регламент работы комплекса. Проведены опытно-промышленные испытания комплекса, определены рациональные технологические режимы эксплуатации комплекса.

Выводы

Разработан мобильный сонохимический комплекс оборудования для очистки сточных вод. Основные эксплуатационные достоинства комплекса:

1. *Универсальность* – модули комплекса легко вписываются в технологические цепочки предприятий без существенных доработок.

2. *Комплексность* – возможность эффективной очистки нефтезагрязненных вод при значительных колебаниях концентрации примесей и значений водородного показателя без предварительной коррекции.

3. *Ресурсосбережение* – применение сонохимической технологии позволяет уменьшить в 1,5...2,0 раза расход химических реагентов при очистке, а также обеспечить возможность использования очищенной воды для технологических и хозяйственных нужд.

4. *Энергосбережение* – низкие эксплуатационные затраты комплекса за счёт автоматизации процессов управления.

5. *Автономность* – для реализации сонохимической технологии не требуется совмещения с дополнительной техникой (в частности, энергоснабжение оборудования обеспечивается генератором, работающим на прямогонном дизельном топливе или бензине, что особенно актуально в условиях Западной Сибири и Крайнего Севера).

6. *Мобильность* – компактность аппаратного оформления позволяет устанавливать контейнеры с технологическими модулями на шасси грузовых автомобилей (или на простейшем фундаменте).

Библиографический список

1. Al-Juboori R.A., Bowtell L.A. Ultrasound technology integration into drinking water treatment train. // In book: Sonochemical Reactions. Edited by Selcan Karakus. IntechOpen. 2019.
2. Mullakaev M.S. Ultrasonic intensification of the processes of enhanced oil recovery, processing of crude oil and oil sludge, purification of oil-contaminated water. - М.: HELRI, 2018. – 376 p.
3. Муллакаев М.С. Ультразвуковая интенсификация процессов добычи и переработки нефти, очистки нефтезагрязненных вод и переработки нефтешламов. М.: НИИ ИЭП. 2019. – 412 с.
4. Abramov O.V., Abramov V.O., Veksler G.B. et al. Ultrasonic activation of reagent purification of surface wastewaters from oil products // Theoretical foundations of chemical engineering. 2009. V. 43. P. 568–574.
5. Абрамов О.В., Кошелева М.К., Кереметин П.П., Муллакаев М.С. Очистка сточных вод текстильных предприятий гальванохимическим методом с использованием ультразвукового поля // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2009. № 3. – С. 107–110.
6. Кереметин П.П., Кошелева М.К., Муллакаев М.С. Исследование и расчёт процесса очистки сточных вод методом гальванокоагуляции с применением ультразвука // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2010. № 2. С. 99–103.
7. Кошелева М.К., Булеков А.П., Кереметин П.П. и др. Оценка эффективности ультразвуковой обработки реагента при очистке сточных вод от органических загрязнений // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2011. № 5. С. 125–129.
8. Keremetin P.P., Parilov P.S., Mullakaev M.S. et al. Definition of regime and technological parameters of sonochemistry clearing of the petropolluted waters // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2011. V. 45. P. 931–937.
9. Муллакаев М.С. Ультразвук в процессах очистки сточных вод. М.: НИИ ИЭП. 2020. 308 с.
10. Краткий определитель бактерий Берджи. Пер. С англ. / под. ред. Дж. Г. Хоулт, Г. А. Заварзин. М.: Мир, 1980. 495 с.
11. Пат. 94967 РФ. Устройство для гальванокоагуляционной очистки сточных вод /М.К. Кошелева, П.П. Кереметин, А.П. Булеков и др. заявитель и патентообладатель МГТУ им. А.Н. Косыгина (RU). № 2010104940/22; заяв. 10.03.2010; опубл. 10.06.2010; Бюл. № 16.

12. Абрамов В.О., Векслер Г.Б., Муллакаев М.С. и др. Ультразвуковой гальванокоагуляционный комплекс очистки загрязненных вод // Экология и промышленность России. 2009. № 10. С. 46–49.

Сведения об авторах

Муллакаев Роберт Маратович, аспирант кафедры «Промышленная экология» факультета химической технологии и экологии Российского государственного университета нефти и газа имени И.М. Губкина, r.m.mullakaev@mail.ru.

УДК 681.5

Мунасыпов И.М., Стуколов Д.А.

РАЗВИТИЕ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ В МАШИНОСТРОЕНИИ

В статье рассматривается развитие системы автоматизированного проектирования с середины прошлого века по наши дни в области машиностроения.

Ключевые слова: система автоматизированного проектирования, станки с числовым программным управлением, гибкие автоматизированные производства, компьютерный инжиниринг, технологии искусственного интеллекта

Munasypov I.M., Stukolov D.A.

DEVELOPMENT OF AUTOMATED CONTROL SYSTEMS DESIGN IN MECHANICAL ENGINEERING

The article discusses the development of a computer-aided design system from the middle of the last century to the present day in the field of mechanical engineering.

Key words: computer-aided design system, numerically controlled machine tools, flexible automated production, computer engineering, artificial intelligence technologies.

В последнее время во всем мире компьютеризация охватила практически все области человеческой деятельности. Становится все больше и больше людей, ежедневно использующих компьютеры для решения сложных производственных задач и автоматизации трудо-

емких технологических процессов. Общеизвестно, что одним из наиболее перспективных направлений применения вычислительной техники является внедрение систем автоматизированного проектирования (САПР) для разработки новых конструкций и изделий. Постоянно растущий уровень аппаратных средств и совершенствование программного обеспечения влекут за собой бурный переход от традиционных, ручных методов проектирования к новым компьютерным технологиям разработки и выполнения инженерной документации.

История развития САПР началась в конце 50-х – начале 60-х гг. прошлого столетия, когда в технологии машиностроения появилось понятие автоматизации технологического проектирования на базе средств вычислительной техники, которое впоследствии оформилось в понятие САПР ТПП (технологической подготовки производства). В истории развития САПР ТПП выделяют несколько этапов.

С 1955-1960 гг. получила развитие вычислительная техника, позволившая выполнить ряд экспериментальных работ по применению вычислительной техники в решении задач технологической подготовки производства. Следующие 5 лет было создано большое количество локальных САПР ТПП, в частности предназначенных для проектирования процессов токарной, фрезерной и сверлильной обработок, появились теоретические работы по САПР, посвященные различным языкам кодирования деталей и попытке формализации самого процесса проектирования технологий.

В период с 1965 по 1970 г. произошла смена поколений вычислительной техники. ЭВМ второго поколения, типа «Минск», стали заменять на более производительные и обладающие большей памятью серии ЕС. Это вызвало оживление в сфере разработки САПР ТПП. Была проведена большая работа по формализации описания деталей, формализации отдельных этапов проектирования технологических процессов, стандартных процедур и программ обработки технологической информации; появились первые методики принятия технологических решений.

Со второй половины 70-х гг. и особенно с начала 80-х гг. XX в. активно разрабатываются и внедряются в производство различные САПР ТПП. В этот период отчетливо выделялись три направления в развитии: метод унифицированного технологического процесса (отражен в трудах Г.К. Горанского, Н.М. Капустина, С.П. Митрофанова), метод синтеза технологического процесса (продолжен и обоснован В.Д. Цветковым) и метод сочетания индивидуальных технологиче-

ских решений с типовыми решениями (впервые теоретически обоснован Б.Е. Челлигуевым). Из зарубежных ученых, работавших в области создания САПР ТПП (CAD/CAM-систем), наиболее известны в нашей стране Г. Шпур и Ф.Л. Краузе (ФРГ), М. Грувер и Э. Зиммере (США), а также У.Д. Энгельке и Б. Хоке (США). Появление многочисленных публикаций этих авторов способствовало развитию технологии машиностроения, применение математических методов и получение строгих правил принятия технологических решений по ряду технологических задач превращает САПР из описательной дисциплины в точную науку [1].

В 70-х и до конца 90-х гг. прошлого века на отечественных предприятиях были внедрены сотни различных систем автоматизации технологического проектирования процессов: обработки резанием, горячей штамповки иковки, холодной штамповки, сборки, термообработки, изготовления жгутов и кабелей и многих других изделий. Их внедрению способствовало оснащение предприятий быстродействующей компьютерной техникой и появление персональных компьютеров. Была разработана унифицированная переналаживаемая технологическая оснастка (УПТО). Созданы специализированные станки для производства изделий космической техники и других уникальных изделий. Академик Л.Н. Кошкин в 60-70-х гг. создал и внедрил в производство большое количество своих автоматических поточных линий роторного типа, отличающихся существенно большей производительностью. Тогда же было разработано множество резцов с механическим креплением неперетачиваемых твердосплавных режущих пластин.

Важнейшим достижением в технологии машиностроения во второй половине XX в. является создание станков с числовым программным управлением (ЧПУ). Сохраняя функциональные возможности автоматических станков, станки с ЧПУ весьма быстро могут переходить от обработки одной номенклатуры деталей к совершенно другой. Для этого достаточно сменить управляющую программу, комплект режущего инструмента и выполнить настройку станка, на что обычно уходит от одного до четырех часов.

Первыми станками с ЧПУ промышленного применения были токарно-винторезный станок 1К62ПУ и токарно-карусельный 1541П. Эти станки одним инструментом могли обрабатывать детали достаточно сложного профиля. Станки работали совместно с управляющими системами типа ПРС-ЗК и другими. Впоследствии парк оборудо-

вания с ЧПУ дополнили вертикально-фрезерные станки марки 6Н13 с управляющей системой «контур-3П».

С середины 70-х гг. в промышленности стали применять многоинструментальные станки с ЧПУ. Многоинструментальные станки с ЧПУ позволили проектировать технологические процессы обработки деталей с укрупненными, насыщенными переходами операциями. В конце 70-х гг. появились достаточно надежные системы ЧПУ отечественного производства типов Н-22 и Н-33, соответственно для токарного и фрезерного оборудования. Среди сверлильных станков станок 2Р135 отличался пятипозиционной инструментальной головкой с позицией для метчика.

В те же годы на отечественных предприятиях появились токарные и фрезерные многоцелевые, многофункциональные станки типа обрабатывающий центр. Первыми многоцелевыми были станки типа MDV-220 «Max Miller» с системой ЧПУ Sinumerik и станки СТП-220 с системой ЧПУ Н-22. Эти станки имели элеваторные инструментальные магазины для размещения в них до 14 инструментов, в том числе различных резцов, сверл и зенкеров, что позволяло выполнять весьма сложные и насыщенные операции, в том числе и над корпусными деталями. Первую группу фрезерных обрабатывающих центров составляли станки ИР-500 и ИР-300 Ивановского станкостроительного завода. Эти станки вначале оснащались системами управления типа Н-33, а затем системами ЧПУ типа «Bosch». Данные станки предназначались для обработки сложных корпусных деталей с применением различных видов фрезерования, сверления, зенкерования, развертывания, нарезания внутренних резьб, точения и растачивания.

Многофункциональные токарные фрезерные станки послужили в середине 80-х гг. основой для создания гибких автоматизированных производств (ГАП). ГАПы способствовали развитию и распространению различных систем автоматизированного проектирования и управления, в том числе САПР ТПП, автоматизированной системы управления (АСУ) и автоматизированной системы управления производством (АСУП), средств вычислительной техники и промышленных роботов.

ГАП позволяло сравнительно быстро переходить к обработке любых по конфигурации деталей из заранее определенного перечня, без перепланировки производственных площадей и какой-либо серьезной переналадки оборудования.

В 21 веке развитие машиностроительных технологий определяется в первую очередь развитием информационных технологий ин-

жиниринга. Сегодня на машиностроительных предприятиях для решения задач автоматизированного проектирования используются следующие системы:

- CAD (*Computer Aided Design*)-системы – позволяют построить компьютерные 3D модели изделий, сборочных узлов и машин в целом, а также получить все необходимые конструкторские документы (спецификации, сборочные чертежи, чертежи деталей).
- CAPP (*Computer-Aided Process Planning*)-системы – позволяют автоматизировать процесс подготовки производства, а именно проектирование технологических процессов и получение технологической документации.
- CAM (*Computer Aided Manufacturing*)-системы – позволяют решить широкий спектр задач, связанных с разработкой и подготовкой управляющих программ для оборудования с ЧПУ. [2]

В настоящее время большинство CAD/CAM или CAD/CAM/CAPP систем являются интегрированными, обеспечивая поддержку процесса сквозного автоматизированного проектирования. Самое главное преимущество интегрированных систем – взаимосвязь конструкторской и технологической информации, которая гарантирует автоматическое или полуавтоматическое внесение изменений в технологию при изменении геометрии изделия. Написание и отладка управляющих программ для современных многокоординатных станков является очень трудоемкой задачей и требует особых профессиональных компетенций не только технолога-программиста, но и оператора станков с ЧПУ. Искусственный интеллект доказал свою полезность в различных приложениях, даже в области автоматизации электронного проектирования. И, судя по всему, еще большее влияние он окажет на технологию САПР в ближайшие годы [2].

В скором будущем ожидается появление CAD-программ, предугадывающих ваши действия, или исправляющих предыдущие ошибки проектирования. Некоторые вендоры уже внедряют искусственный интеллект в программы, а в ближайшие годы это станет еще более распространенным.

Библиографический список

1. История отраслей машиностроения: учебное пособие / Н.И. Веткасов, Ю.В. Псигин; под общ. ред. Н.И. Веткасова. – Ульяновск: УлГТУ, 2015. – 165 с.

2. Штерензон В.А. САПР-ориентированная подготовка бакалавров профессионального обучения Электронный научно-практический журнал «Современные научные исследования и инновации» [Электронный ресурс] URL: <https://web.snauka.ru/issues/2013/10/26761/> (дата обращения: 10.05.2021).

Сведения об авторах

Мунасыпов Ильдар Мухтарович, кандидат педагогических наук, доцент СФ БашГУ (Стерлитамак). E-mail: i.m.munasypov@strbsu.ru.

Стуколов Данила Андреевич, студент 3 курса ЕНФ СФ БашГУ (Стерлитамак). E-mail: danilastuko@gmail.com.

УДК 681.586.5

Очилов Б.Х., Хасанов М.М.

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ МНОГОМОДОВЫХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ

В статье приведены результаты исследований методов измерения с помощью многомодовых волоконно-оптических датчиков, основанные на механизмах преобразования с помощью дифракционных решеток.

Ключевые слова: волоконно-оптический датчик, оптическое волокно, дифракционная решетка, дифракционная модуляция, гидрофон, дифракционный датчик, модуляция интенсивности, модулятор.

Ochilov B.H., Khasanov M.M.

MEASUREMENT METHODS USING MULTI-MODE FIBER OPTICAL SENSORS

The article presents the results of research on measurement methods using multimode fiber-optic sensors based on conversion mechanisms using diffraction gratings.

Keywords: fiber optic sensor, optical fiber, diffraction grating, diffraction modulation, hydrophone, diffractive sensor, intensity modulation, modulator.

Волоконно-оптические датчики можно разделить на два класса: датчики, в которых исследуемое явление воздействует на свет во время его распространения по оптическому волокну, и датчики с внешним чувствительным элементом, в которых свет выводится из оптического волокна, подвергается воздействию и снова запускается в волокно для передачи в блок обработки сигнала. Здесь мы рассмотрим датчики с внешним чувствительным элементом, механизм преобразования которых основан на эффекте, создаваемом дифракционной решеткой [1,2].

Волоконно-оптические датчики с движущимися решетками могут применяться для измерения любого параметра, изменение которого может проявляться через относительное движение двух решеток. Одним из самых первых приборов, работающих по этому принципу, был волоконно-оптический гидрофон [3]. В дальнейшем этот гидрофон был всесторонне изучен [4]. Схематическое представление гидрофона показано на рис. 1. Свет из многомодового оптического волокна коллимируется стержневой микролинзой с градиентным показателем преломления и проходит через структуру дифракционных решеток, после чего фокусируется на входе выходного волокна второй микролинзой. Дифракционные решетки присоединены к двум гибким мембранам, расположенным сверху и снизу корпуса гидрофона. Прогиб мембран под воздействием переменного акустического давления приводит к относительному перемещению решеток, и, таким образом, модулирует количество излучения, проходящего между входным и выходным волокнами. В приборе использовался период решетки s , равный 10 мкм, с 50% периода (5 мкм), доступными для модуляции. Оптическая пропускная способность может быть описана как произведение трех множителей: (1) доля света, первоначально запущенного во входное волокно, доходящая до выходного волокна в отсутствие структуры дифракционных решеток; (2) доля света, падающего на структуру дифракционных решеток и проходящая через нее (функция s и относительного расположения решеток); и (3) доля света, проходящая через структуру решеток при нулевом порядке дифракции по отношению к общему количеству прошедшего света.

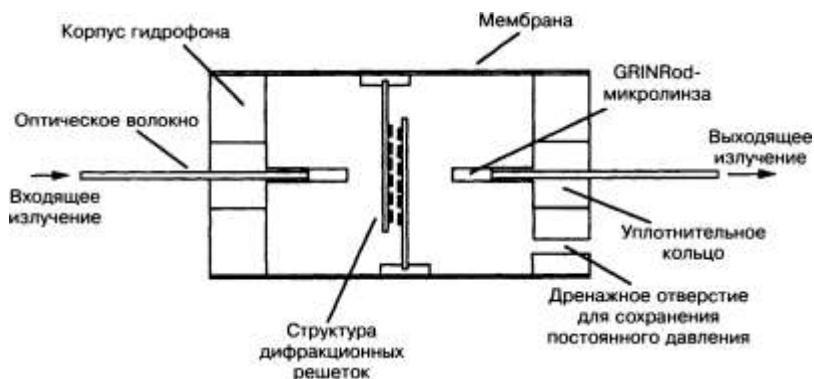


Рис. 1. Схематическое представление волоконно-оптического гидрофона на основе структуры дифракционных решеток

Ключевой элемент гидрофона, модулятор на основе движущихся в противоположных направлениях дифракционных решеток, состоит из двух кусков покровного стекла размером 9×3 мм, $0,7$ мм толщиной каждый, образующих подложки для $1,6 \text{ мм}^2$ решеток. Они были изготовлены из 5 мкм полос с помощью маски из фоторезиста методом обратной литографии и 120 нм напылением хрома. Две решетки сведены вместе и выровнены так, чтобы их полосы были параллельны, и смещены одна относительно другой на половину ширины полосы для достижения максимума чувствительности.

После изготовления прибор был протестирован в лаборатории для определения его рабочих характеристик. В качестве источника света использовался гелий-неоновый лазер Hughes 2 мВт . Свет запускался во входное волокно через 10 -кратный микрообъектив. Свет из выходного волокна регистрировался фотодиодом большой площади RCA C30808 с нагрузочным резистором сопротивлением 200 кОм .

При освещении отражательной дифракционной решетки с чередующимися отражающими и поглощающими полосами широкополосным светом под постоянным углом θ_0 дифракция света зависит от периода решетки s (расстояния между центрами отражающих полос) и угла регистрации θ_1 в соответствии с уравнением решетки. Если уравнение решетки применить к дифракционной решетке, период которой является линейной функцией положения вдоль длины решетки $s = s_0 + s_1 x$, то освещенную часть решетки можно определить по формуле

$$x = \frac{\lambda}{s_1(\sin \theta_0 + \sin \theta_1)} - \frac{s_0}{s_1}. \quad (1)$$

Вид модуляции длины волны широкополосного источника (узкополосная фильтрация) показан на рис. 2.

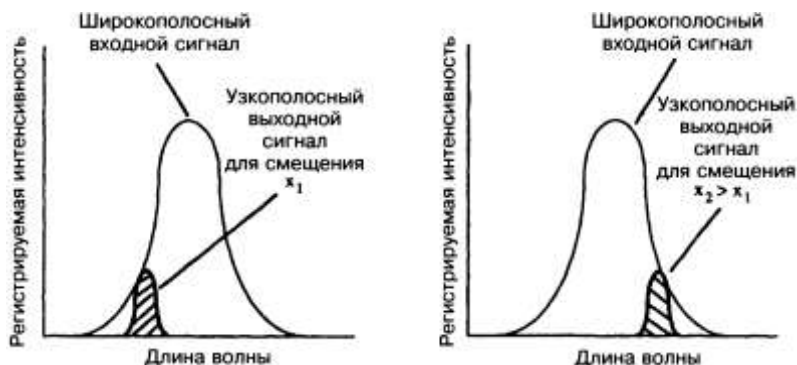


Рис. 2. Зависимость передачи узкополосного сигнала датчиком с решеткой с линейно изменяющимся периодом от смещения

Применимость метода измерения смещения при помощи решетки с линейно изменяющимся периодом была изучена для двух различных методов изготовления решеток. Первая отражательная решетка была изготовлена Applied Image, Inc. традиционным фотолитографическим методом, и ее период изменялся от 10 до 20 мкм при общей длине решетки 3,175 см. Однако неприемлемая эффективность решетки и множественное перекрытие порядков сделали невозможной интерпретацию заложенной в спектре информации о смещении. Затем была предпринята попытка изготовления решетки с линейно изменяющимся периодом голографическим способом.

Обычные голографические решетки, имеющие постоянный период, изготавливаются интерферирующими плоскими волновыми фронтами. Голографические решетки с линейно изменяющимся периодом были изготовлены на обычной фотографической пластинке. Использовался гелий-неоновый лазер с интерферирующими плоским и сферическим волновыми фронтами. Период решетки, сформированной таким образом, изменяется как функция положения благодаря изменению угла пересечения между волновыми фронтами вдоль ширины подложки. Вычисленная нелинейность изменения периода ре-

шетки в этом эксперименте составила 0,16 % при использовавшемся 10 мм диапазоне. После того как открытая поверхность подложки была обработана, созданная решетка была металлизирована для использования ее на отражение. Такой метод позволяет изготавливать «линейно-модулированные» решетки с высоким разрешением.

Выводы. Из этих результатов понятно, что этот метод допускает возможность проведения высокоточных измерений линейных смещений при помощи волоконной оптики. Если нанести дифракционную решетку по окружности поворотного вала, этот метод можно также очень просто применить для определения положения при вращении. Измерения можно выполнять, по сути, бесконтактным способом, используя исключительно дифракционную решетку с линейно изменяющимся периодом, прикрепленную к смещаемому объекту.

Библиографический список

1. Хасанов М.М., Юсупов Я.Т. Использование эффекта фокусировки в волоконно-оптических датчиках // Научно-практический журнал «Мухаммад ал-Хоразми авлодлари». 2019. №2(8). С. 71-75.
2. Udd E., William B., Spillman J. Fiber optic sensors: an introduction for engineers and scientists. – John Wiley & Sons, 2011. – p. 512.
3. Волоконно-оптические датчики. Под ред. Э. Удда. – М.: Техносфера, 2008. – 526 с.
4. Hunsperger R.G. Integrated Optics: Theory and Technology. 6th Edition. – Springer Science +Business Media, LLC, 2009. – P. 525.

Сведения об авторах

Очилов Бобир Халимбаевич, ассистент кафедры «Радиотехнические устройства и системы» ТашГТУ (Ташкент). E-mail: ochilov_bobir@rambler.ru.

Хасанов Миркомил Мирхидоят угли, старший преподаватель кафедры «Радиотехнические устройства и системы» ТашГТУ (Ташкент). E-mail: Khasanov.74@list.ru.

Сухинец Ж.А., Галиев А.Л., Гулин А.И.

**РАЗРАБОТКА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ
ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ГАЗОВОГО ПОТОКА С
ПРОГРАММНЫМ БЛОКОМ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ**

В статье представлены расчёты отдельных блоков дифференциальной системы измерения температуры газового потока с программным блоком обработки информации и обоснован выбор микроконтроллера для реализации быстрого преобразования Фурье.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, температура, акустический мультивибратор, быстрое преобразование Фурье.

Sukhinets Zh.A., Galiev A.L., Gulin A.I.

**DEVELOPMENT OF A DIFFERENTIAL SYSTEM FOR
MEASURING THE TEMPERATURE OF A GAS FLOW WITH
A SOFTWARE UNIT FOR INFORMATION PROCESSING**

The article presents calculations of individual blocks of a differential system for measuring the temperature of a gas flow with a software unit for information processing and justifies the choice of a microcontroller for implementing a fast Fourier transform.

Keywords: gas turbine engine, temperature, acoustic multivibrator, fast Fourier transform.

Введение

Одним из важных требований к характеристикам управления ГТД является высокая точность поддержания (ограничения) заданной температуры [1] на установившихся и переходных режимах его работы. Регулирования на режимах, предельных по температуре газа, является основным [2] для получения требуемых характеристик и сохранения ресурса двигателя. Погрешности регулирования температуры газа на установившихся режимах не должны превышать $5 \div 10 \text{ K}$, а на переходных режимах допустимая величина «заброса» температуры составляет $30 \div 50 \text{ K}$ на время не более $0,5 \div 1 \text{ с}$. При этом скорость изменения температуры газа на переходных режимах может достигать 500 K/с . Величина неравномерности поля температур ГТД, как перед турбиной, так и за турбиной по радиусу и по окружности [3]

составляет $100 \div 200$ градусов, изменяется в зависимости от режима работы двигателя. Отмечается также нерегулярность поля температур газа, т.е. в одной и той же точке измерения при неизменном режиме работы двигателя температура газа во времени изменяется по произвольному закону. Это объясняется непостоянной подачей топлива в ГТД и большой турбулентностью потока воздуха. Таким образом, измерить истинную температуру газа в двигателе весьма сложно и осуществить это возможно лишь приближенно. Поэтому обычно вместо локальной измеряют среднемассовую, осредненную температуру. Для приближения измерения температуры к среднемассовой с погрешностью не более ± 2 градуса обычно устанавливают от 8 до 24 и более термопар. Для компенсации динамической погрешности термопары в цепь измерения после нее вводят последовательное корректирующее устройство с тем, чтобы на выходе из него сигнал содержал составляющие, пропорциональные изменению ЭДС термопары и ее производной.

Струйные системы измерения температуры имеют большие перспективы, т.к. обладают высоким быстродействием [4], на три порядка выше термопреобразователей, нечувствительностью к электромагнитным и радиационным полям, простотой конструкции и высокой надежностью. Однако, сложность сопряжения струйно-акустических датчиков с цифровыми системами обработки измерительной информации из-за особенностей выходного полигармонического сигнала и влияния собственной резонансной частоты пьезопреобразователя, многократно усиливающего вторую третью гармоники сдерживает их внедрение в промышленность. Все это предопределяет целесообразность и актуальность проведения исследований, направленных на устранение негативных факторов и создания быстродействующих, надежных измерителей температуры газов ГТД.

1. Разработка структурной схемы системы измерения с программным блоком обработки информации

К достоинствам программной реализации относятся:

- неизменная структура системы при различных алгоритмах и областях применения;
- хорошая гибкость, позволяющая достаточно легко изменять алгоритмы работы системы за счет коррекции или изменения программы;

– существенное ускорение, облегчение и удешевление проектирования, изготовления и отладки системы, поскольку вместо прибора разрабатывается программа.

Недостатком программной реализации является относительно низкое быстродействие по причине последовательного выполнения операций программы в одном процессоре: как бы ни увеличивали скорость выполнения команд, она будет оставаться ниже производительности соответствующего устройства, реализованного аппаратно. Отсюда вытекает задача обеспечения реального времени, которая подразумевает два обстоятельства:

1) время обработки одного отсчета или группы отсчетов сигнала должно быть меньше допустимого времени задержки; контроль за выполнением этого условия осуществляется как при написании программы, так и при ее отладке;

2) цикл работы программы и моменты поступления отсчетов входного сигнала должны быть строго согласованы по времени.

Все это предопределяет целесообразность и актуальность проведения исследований, направленных на создание быстродействующих измерителей температуры газов ГТД с минимальным количеством промежуточных преобразований информативного сигнала. Таким требованиям отвечают, прежде всего, устройства, созданные на основе микропроцессорных средств измерения, позволяющие реализовывать сложные алгоритмические и математические операции с высоким быстродействием.

Структурная схема разработанной дифференциальной системы измерения температуры газового потока представлена на Рис. 1. Дифференциальное включение повышает быстродействие системы [2] в два с лишним раза за счет сокращения переходного процесса установления разностной частоты. Схема работает следующим образом. При помещении двух акустических мультивибраторов (АМ) 1 и 2, расположенных в одном корпусе, но относящихся к двум каналам измерения, в газовый поток, абсолютную температуру T которого измеряют, в них возбуждаются акустические колебания с частотами nf_1 и nf_2 , преобразуемые с помощью пьезоэлементов (ПЭ) 3 и 4 в соответствующие электрические полигармонические колебания амплитудой приблизительно равной 1 мВ, которые в свою очередь поступают на входы фильтров низких частот (ФНЧ) 5 и 6, необходимых для подавления помех находящихся выше верхней границы диапазона измерения 31200 Гц, что позволяет избежать эффекта наложения спек-

тров. Далее сигналы усиливаются приблизительно в 700 раз с помощью операционного усилителя (ОУ) 7 и 8 до амплитуды около 700 мВ. Дифференциальные усилители (ДУ) 9 и 10 преобразуют двухполярные сигналы каждого канала в однополярные с искусственной средней точкой равной половине напряжения питания. Далее сигналы поступают на входы SAR АЦП микроконтроллера (МК) 11, где осуществляется измерение сигналов, выделение и определение частот первых гармоник каждого канала. МК осуществляет вычисление разницы частот $\Delta f = f_1 - f_2$ и температуры газового потока T . Измеренные и вычисленные данные частот первых гармоник двух каналов, разницы частот и температуры газового потока отображаются на индикаторе ЖКИ 13. Светоизлучающий индикатор (СИИ) 12 отображает режим работы: 1 – первый канал, 2 – второй канал, 3 – разница двух каналов. С помощью энкодера (Э) 14 осуществляется ввод коэффициента b , зависящего от конструктивных параметров датчика, и коэффициентов деления k_1 и k_2 делителей частоты. Энергонезависимая память (П) 15 предназначена для хранения коэффициентов. Значения частот первых гармоник, разницы частот и температуры газового потока с помощью конвертера (К) 16 передаются в сеть RS-485 по запросу от внешнего устройства с помощью интерфейса персонального компьютера (ИПК) 17 по интерфейсу USB на персональный компьютер. Частотный выход (ЧВ) 18 предназначен для передачи значения разницы частот внешнему устройству.

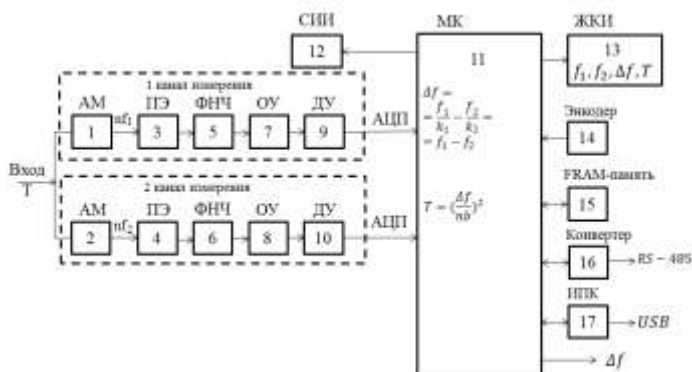


Рис. 1. Дифференциальная система измерения температуры газового потока

1.1. Проектирование фильтра низких частот

Сигналы от АМ через ПЭ при помощи экранированного кабеля поступают на вход ФНЧ, который построен по П-образной схеме рис. 2.

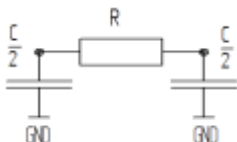


Рис. 2. П-образный фильтр низких частот

Частота среза фильтра рассчитывается по формуле:
для первого канала измерения

$$f_{ср1} = \frac{1}{2\pi R_4 (C_2 + C_5)} 32374 \text{ Гц},$$

для второго канала измерения

$$f_{ср1} = \frac{1}{2\pi R_3 (C_1 + C_3)} = 32374 \text{ Гц}.$$

1.2. Проектирование усилителя

Выходная мощность пьезоэлектрических преобразователей очень мала, поэтому на выходе преобразователей должен быть включен усилитель с возможно большим входным сопротивлением. Усилитель и ПЭ соединяются экранированным кабелем.

Эквивалентная схема ПЭ, соединенного кабелем с измерительной цепью, представлена на рис. 3, на котором сопротивление R равно сопротивлению параллельного соединения R_0 , $R_{вх}$ и емкость $C = C_0 + C_{вх}$, где C_0 – емкость между гранями пьезоэлектрика (емкость преобразователя); $C_{вх}$ – емкость кабеля и входная емкость измерительной цепи; R_0 – сопротивление преобразователя; $R_{вх}$ – входное сопротивление измерительной цепи.

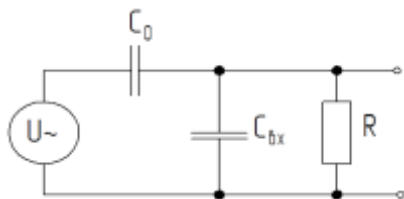


Рис. 3. Эквивалентная схема пьезоэлектрического преобразователя

Напряжение, поступающее на вход усилителя, равно

$$U_{\text{вх}} = \frac{q}{C} \cdot \frac{j\omega RC}{1 + j\omega RC}.$$

Выходное напряжение ПЭ зависит от емкости входной цепи. Постоянная времени цепи равна

$$\tau = RC.$$

Расширение частотного диапазона путем увеличения емкости C осуществляется включением параллельно преобразователю конденсаторов, однако, это приводит к уменьшению выходного напряжения преобразователя. Увеличение сопротивления R приводит к расширению частотного диапазона без потери чувствительности, однако повысить сопротивление можно только путем улучшения качества изоляции и применения усилителей с высокоомным входом [5], например, ИОУ INA118.

Для того чтобы уменьшить нестабильность чувствительности, параллельно входу усилителя включается дополнительная стабильная емкость $C_{\text{вх}} = C_1 = C_2$.

Таким образом, при емкости $C = C_1 = C_2 = 4700$ пФ и входного сопротивления измерительной цепи $R = 300$ кОм (сопротивление пьезодатчика, при высоком входном сопротивлении усилителя) постоянная времени $\tau < 1,4$ мс.

Собственный шум усилителя напряжения не зависит от емкостной нагрузки на входе [6], что является достоинством схемы.

Для МК, реализующем быстрое преобразование Фурье (БПФ), важным являются динамические характеристики схемы и отсутствие шумов.

Разработанный усилитель состоит из элементов:

- для первого канала измерения D1, R7, R9, R10, R13, C7, C9.
- для второго канала измерения D2, R8, R11, R12, R14, C8, C10.

Коэффициенты усиления G рассчитываются по формуле для первого канала измерения

$$G_1 = 1 + \frac{50000}{R_9 + R_{10}}.$$

Коэффициент усиления для второго канала измерения

$$G_2 = 1 + \frac{50000}{R_{11} + R_{12}}.$$

При $R_{10} = R_{12} = 0$ для заданного коэффициента усиления $G_1 = G_2 = 700$ потенциометры обоих каналов необходимо выставить в значение, которое рассчитывается по формуле

$$R_9 = R_{11} = \frac{50000}{700+1} = 71,3 \text{ Ом}.$$

1.3. Проектирование дифференциального усилителя

Для того чтобы измерить отрицательные напряжения с помощью АЦП, необходимо создать смещение отрицательного сигнала в положительный. Схема ДУ на операционном усилителе (сумматор) обеспечивает низкое выходное сопротивление и высокий выходной ток, при этом обладая низким уровнем шума, в отличие от схемы на пассивных элементах [7].

На принципиальной схеме ДУ состоит из элементов:

для первого канала измерения D3B, R23, R24, R28

для второго канала измерения D3A, R20, R21, R27, C37

где C37 – блокировочный конденсатор сдвоенного операционного усилителя D3.

ДУ предназначен для преобразования сигнала переменного напряжения в однополярный сигнал с искусственной средней точкой равной половине напряжения питания.

На резисторах R17, R18 и R15, R16 выполнен источник напряжения амплитудой равной половине напряжения питания

$$U/2 = 3,3/2 = 1,65 \text{ В}.$$

Выходные сигналы после ДУ на выводе 7 микросхемы D3B канала 1 и выводе 1 микросхемы D3A канала 2 равны

$$U_{D3B} = 1,65 \cdot \frac{R_{24}}{R_{23} + R_{24}} \cdot \left(1 + \frac{R_{28}}{R_{19}} \right) - U_{A1} \cdot \frac{R_{28}}{R_{19}};$$

где U_{A1} – напряжение в контрольной точке A1 принципиальной схемы.

$$U_{D3A} = 1,65 \cdot \frac{R_{21}}{R_{20} + R_{21}} \cdot \left(1 + \frac{R_{27}}{R_{22}} \right) - U_{B1} \cdot \frac{R_{27}}{R_{22}};$$

U_{B1} – напряжение в контрольной точке В1 принципиальной схемы.

После ДУ сигналы фильтруется Г-образным низкочастотным фильтром с частотой среза

$$f_{c1} = \frac{1}{2\pi R_{36} C_{14}} = 33864 \text{ Гц};$$

$$f_{c2} = \frac{1}{2\pi R_{35} C_{13}} = 33864 \text{ Гц}.$$

1.4. Выбор микроконтроллера

Для реализации метода измерения частоты (определения первой гармоники) используется МК общего применения STM32F373 (семейство ARM Cortex-M4) [8,9], выбор которого обусловлен тем, что подобные современные МК обладают набором функций, который позволяет эффективно реализовывать при работе в реальном масштабе времени (PMB) сложные алгоритмы цифровой обработки сигналов, ранее доступные для реализации лишь на специализированных процессорах ЦОС или ПЛИС.

Программные и аппаратные особенности данного МК, используемые в разработке:

1. Многоканальный 12-разрядный SAR АЦП со скоростью работы до 1 млн. измер/сек.

2. Контроллер прямого доступа к памяти DMA, использующийся для быстрого перемещения данных в память без участия ядра (из АЦП сразу в память).

3. Наличие специальных инструкций в ядре Cortex-M4, позволяющее эффективно реализовывать алгоритмы цифровой обработки сигналов (фильтрация, спектральный анализ и т.п.).

4. FPU - аппаратный модуль вычислений с плавающей точкой, который дает выигрыш скорости по сравнению с программной реализацией сложных математических операций как минимум на порядок.

Сигналы после ДУ поступают через определенные резисторы в зависимости от типа АЦП: 16-разрядный сигма-дельта (SD) АЦП высокого разрешения со скоростью работы до 50 тыс. измер/сек или 12-разрядный SAR АЦП со скоростью работы до 1 млн. измер/сек. В данном случае для обеспечения частоты измерения 70 кГц

(максимальная частота сигнала, умноженная на 2) сигналы подаются через резисторы на входы SAR АЦП, который встроен в МК.

Каналы АЦП синхронно запущены в режиме непрерывного измерения, а контроллер DMA непрерывно пересылает данные измерений этих АЦП в специально выделенные области памяти ОЗУ МК. МК при получении в ОЗУ очередных партий данных с АЦП, достаточных для проведения расчета, производит цифровую обработку измеренных данных с целью определения частоты первых (основных) гармоник в сигналах с АМ и вычисления разницы частот Δf между ними, которая пропорциональна температуре газового потока T . Микроконтроллер способен по отсутствию сигнала частоты в рабочем диапазоне определить неисправность одного из АМ. В этом случае разница частот Δf рассчитывается по формуле

$$\Delta f = \frac{f_1}{k_1} - \frac{f_2}{k_2} = f_1 - f_2,$$

где k_1 и k_2 – коэффициенты деления.

Так выходная частота f АМ температуры газов ГТД при изменениях абсолютной температуры $T = 293 \div 1650 \text{ K}$ изменяется от 13200 до 31200 Гц по закон

$$f_n = nb\sqrt{T},$$

где n – номер гармоники; b – коэффициент, зависящий от конструктивных параметров датчика.

Из-за того, что гармоники основной частоты сигнала АМ попадают в рабочий диапазон, то для определения первой гармоники используется метод БПФ, который позволяет получить распределение спектра входного сигнала и выделить из него первую гармонику.

Если выбрать частоту оцифровки входного сигнала $\sim 70 \text{ кГц}$ при условии, что частоты с выходов АМ выше 31200 Гц значительно подавлены с помощью входного ФНЧ (для избегания устранения эффекта наложения спектров), то для получения разрешения по частоте (температуре) примерно в $\sim 5 \text{ K}$ (68,3 Гц) необходимо выбрать количество точек для БПФ равным 1024 ($\sim 70 \text{ кГц} / 68,3 \text{ Гц}$).

Для улучшения разрешения по частоте можно увеличивать размер окна БПФ, удвоение количества точек в два раза улучшит разрешение, но и увеличит в два раза время измерения с помощью АЦП. Вычисление БПФ на окне размером 1024 точки при работе микроконтроллера STM32F373 на тактовой частоте 72 МГц занимает $\sim 1,5 \text{ мс}$ при формате числе с фиксированной точкой и

разрядностью 16 бита [10,11], что позволяет в реальном масштабе времени проводить измерение частоты по двум каналам как минимум до нескольких десятков раз в секунду.

Заключение

Использование разработанной дифференциальной системы измерения температуры газового потока с программным блоком обработки информации САУ летательными аппаратами позволит увеличить ресурс ГТД, экономию топлива и создать системы автоматического взлета и посадки, а также предотвращать помпажные явления.

Библиографический список

1. <http://fb.ru/article/229528/turboventilyatornyi-dvigatel-pd-harakteristiki-sravnenie-ispytaniya-primenenie>.
2. <http://avia.pro/blog/regulirovanie-temperatury-gaza-v-gtd>.
3. <https://studfiles.net/preview/731035/page:5/>
4. Сухинец Ж.А., Галиев А.Л., Гулин А.И. Дифференциальный способ измерения температуры газовых потоков с использованием струйно-акустических датчиков // Авиакосмическое приборостроение. – 2015. – № 10 – С. 4–11.
5. Левшина Е.С., Новицкий П.В. Электрические измерения физических величин. Л.: Энергоатомиздат, 1983 – 320 с.
6. Новицкий П.В., Кнорринг В.Г., Гутников В.С. Цифровые приборы с частотными датчиками. – Л.: Энергия, 1970. – 424 с.
7. INA118, Texas Instruments, Jan. 2016.
8. Гутников В.С. Интегральная электроника в измерительных устройствах. – 2 изд. перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 304 с.
9. Ричард Лайонс. Цифровая обработка сигналов: 2-е изд. Пер. с англ. – М.: ООО. «Бином-Пресс», 2006 г. – 656 с.
10. STM32F373xx Datasheet. STMicroelectronics. June 2016.
11. AN4841. Application note. Digital signal processing for STM32 microcontrollers using CMSIS. STMicroelectronics. March 2016.

Сведения об авторах

Сухинец Жанна Артуровна, к.т.н., доцент УГАТУ (Уфа). E-mail: sukhinets@mail.ru.

Галиев Анвар Лутфрахманович, доктор технических наук, профессор СФБашГУ (Стерлитамак). E-mail: galievanvar@mail.ru.

Гулин Артур Игоревич, доктор технических наук, профессор УГНТУ (Уфа). E-mail: gulin1940@gmail.com.

УДК 621.3.083

Тимофеев А.О., Ясовеев В.Х.

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА ДИАГНОСТИКИ И УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ШТАНГОВОЙ ГЛУБИННОНАСОСНОЙ УСТАНОВКИ

Статья посвящена анализу алгоритмических и схемотехнических решений в процессе создания программно-аппаратного комплекса диагностики и управления для штанговой глубиннонасосной установки.

Ключевые слова: динамометрирование, ваттметрирование, скважина, штанговый глубинный насос.

Timofeev A.O., Yasoveev V.Kh.

SOFTWARE AND HARDWARE COMPLEX DEVELOPMENT FOR DIAGNOSTICS AND CONTROL OF THE SUCKER ROD PUMPING UNIT

The article is devoted to the analysis of algorithmic and circuitry solutions in the process of creating a software and hardware complex for diagnostics and control for a sucker rod pumping unit.

Key words: dynamometry, wattmetry, well, beam pump.

Процесс нефтедобычи при помощи штанговых глубиннонасосных установок (ШГНУ) является одним из самых энергоэффективных – удельная себестоимость добычи таким способом является одной из минимальных. В то же время штанговый насос является одним из самых надежных устройств нефтедобычи – средняя наработка на отказ оказывается значительно выше остальных устройств нефтедобычи. Несмотря на это, требования по обеспечению контролепригодности и экологичности предписывают постоянный контроль состояния скважинного куста в целом и ШГНУ в частности. Особое значение имеет быстроедействие системы контроля. Современные системы мониторинга и контроля предполагают наличие удаленного сервера, позволяющего анализировать информацию с каждого из кустов скважин и устанавливать режим управления для каждой.

Примером такого подхода является программно-технологический комплекс [1], структурная схема которого приведена на рисунке 1. В состав комплекса входит станция управления, датчики динамометрирования, каналы телемеханики, сервер. Станция управления позволяет контролировать параметры нефтяной скважины и управлять её режимами в автоматическом или ручном режиме.



Рис. 1. Структура типового программно-технологического комплекса мониторинга и контроля ШГНУ

Получение достоверной информации в реальном времени о состоянии ШГНУ является одним из ключевых условий эффективного её функционирования. Решающими показателями для такого снижения являются эффективное использование нефтедобывающего оборудования ШГНУ и снижение энергозатрат на добычу нефти. Для достижения этих показателей необходимо применять диагностику наземного и подземного оборудования ШГНУ и на её основе выбирать оптимальные режимы эксплуатации и периоды технического обслуживания оборудования – тем самым получать значительную экономию электроэнергии и снижение затрат на проведение технического обслуживания.

Среди наиболее информативных способов получения информации о состоянии ШГНУ выделяют динамометрирование и ваттметрирование. Динамометрирование позволяет оценить состояние подземного оборудования ШГНУ, в то время как ваттметрирование направлено главным образом на диагностику наземного оборудования ШГНУ [2]. Характерной особенностью ваттметрирования является

определение энергетических параметров наземного оборудования путем анализа электрических характеристик (напряжения, тока и мощности) в цепи электрооборудования. На основе данных параметров можно сделать вывод об эффективности ШГНУ в целом. Помимо этих способов следует выделить специализированные методы диагностики и контроля ШГНУ, которые позволяют контролировать и уменьшать дополнительные механические потери на несбалансированность станка-качалки. [3,4]. Достоинством таких методов является относительная простота определения несбалансированности, повышенная точность определения механических потерь, а также снижение издержек на эксплуатацию и ремонт за счет применения беспроводных технологий передачи информации [5,6].

Внедрение таких способов диагностики и контроля в единый аппаратно-программный комплекс позволяет существенно улучшить глубину и полноту контроля оборудования ШГНУ – тем самым обеспечить автономность и энергоэффективность работы ШГНУ.

Главной отличительной особенностью разрабатываемого программно-аппаратного комплекса является его автономность, которая позволяет осуществлять работу ШГНУ в полностью автоматическом режиме с учетом внешних и внутренних факторов. Для поддержания функции автономности разрабатываемый комплекс содержит алгоритмические и аппаратные улучшения. Аппаратные улучшения основаны на применении унифицированных компонентов с диапазоном работы от минус 40 °С до плюс 50 °С с учетом их взаимного влияния: при их изготовлении применяются материалы и комплектующие, исключающие пожар и выделение ядовитых газов от перегрева элементов конструкции, в том числе в результате короткого замыкания электроцепей или в результате других неисправностей комплекса. При этом исключается опасное воздействие на технический персонал во время проведения регламентных работ или технического обслуживания комплекса.

Аппаратная часть разрабатываемого комплекса оснащается двумя высокопроизводительными 32-разрядными микроконтроллерами STM32F407VGT6, один из которых входит в модуль сбора информации, второй – в модуль обработки информации и управления. Структурная схема разрабатываемого комплекса представлена на рисунке 2. Модуль сбора информации выполняет функции сбора диагностической информации от датчиков ШГНУ, а также прием, хранение и передачу диагностической информации на диспетчерский пункт.



Рис. 2. Структура разрабатываемого программно-аппаратного комплекса диагностики и управления ШГНУ

Передача информации осуществляется по радиоканалу и проводным линиям связи (интерфейсы RS-485, I²C). Ключевая диагностическая информация записывается во внешнюю энергонезависимую память (Flash-память). Внутриканальный обмен между модулями осуществляется по CAN-протоколу (2.0 B) Структурная схема модуля сбора информации представлена на рисунке 3. Модуль обработки информации и управления реализует алгоритмы управления и прогнозирования, построенные на основе искусственной нейросети. При этом данный модуль выполняет часть функций SCADA-системы: контроль состояния оборудования ШГНУ, обработка информации с датчиков, а также установка режима от качки для ШГНУ. Блок-схема алгоритма управления представлена на рисунке 4.

При подаче питания микроконтроллер начинает процессы инициализации главного контроллера, портов ввода-вывода и искусственной нейросети. Описание нейросети приведено в [7].

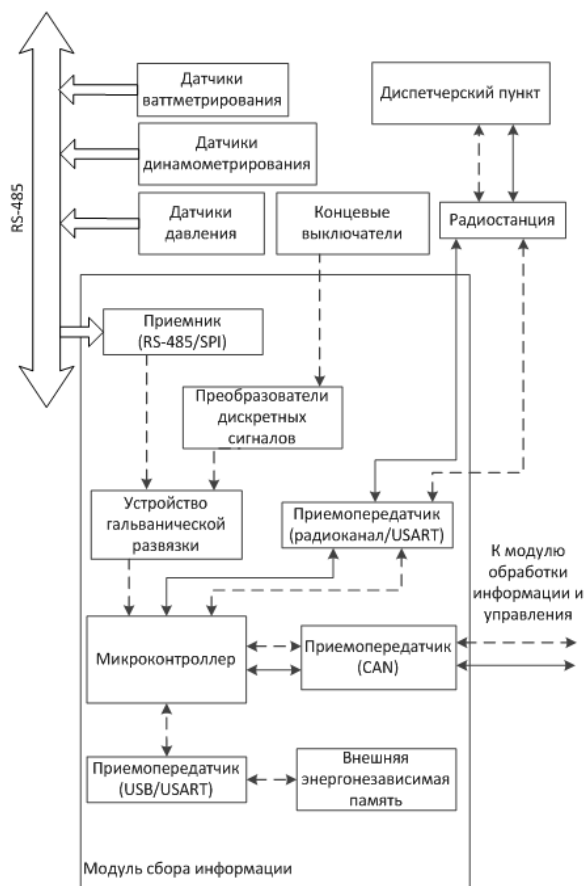


Рис. 3. Структурная схема модуля сбора информации

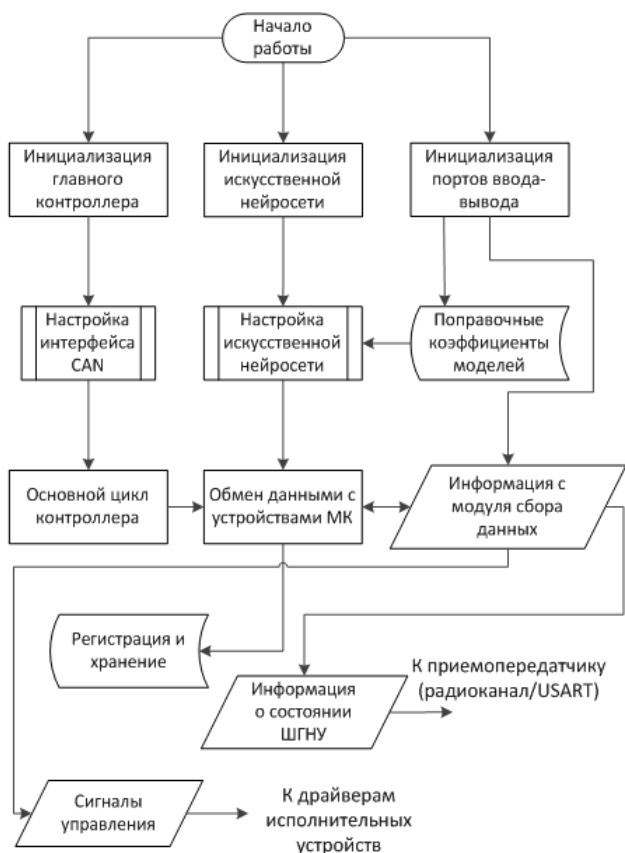


Рис. 4. Блок-схема алгоритма управления

Особенностью реализации нейросети является возможность корректировки веса функций (тренировки) путем ввода поправочных коэффициентов моделей на основе дополнительной статистической информации (уточненных карт неисправностей оборудования, скорректированных моделей прогнозирования состояния оборудования и т.п.).

Заключение

Предложенный программно-аппаратный комплекс позволяет проводить диагностику наземной и подземной частей оборудования ШГНУ, проводить диагностику несбалансированности, а также про-

водить анализ состояния оборудования при помощи искусственной нейросети.

Библиографический список

1. Закиров А.А. Программно-аппаратные комплексы для мониторинга, управления, метрологического обеспечения, анализа и диагностики работы скважин, оборудованных УШГН // Инженерная практика. – 2015. – № 9. – С. 88-94.
2. Тахаутдинов Ш.Ф. и др. Обработка практических динамограмм на ПЭВМ. – Казань: Новое Знание, 1997. – 76 с.
3. Тимофеев А.О., Ясовеев В.Х. Анализ корреляции между скважинной динамограммой и энергией, потребляемой электродвигателем станка-качалки. Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2016. – Т. 12. – № 2. – С. 85-89.
4. Тимофеев А.О., Ясовеев В.Х. Способ определения неуравновешенности станка-качалки скважинной штанговой насосной установки. Патент на изобретение RU 2621435 С, publ. 06.06.2017.
5. Тимофеев А.О., Ясовеев В.Х. Автономный датчик усилия системы динамометрирования штанговой скважинной глубиннонасосной установки // Вестник УГАТУ. – 2015. – Т. 19 – № 4 (70). – С. 34-39.
6. Тимофеев А.О., Ясовеев В.Х. Беспроводной бесконтактный датчик положения штока скважинной штанговой глубиннонасосной установки. Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2019. – № 1. – Т.15. – С. 94-99.
7. Ясовеев В.Х., Тимофеев А.О. Интеллектуализированная информационно-измерительная система для диагностики состояния скважинной штанговой насосной установки. Proceedings of the 2nd International Conference. – Уфа, 2014. – С. 37-40.

Сведения об авторах

Тимофеев Александр Олегович, ассистент кафедры информационно-измерительной техники УГАТУ (Уфа). E-mail: aleck07@mail.ru.

Ясовеев Васих Хаматович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информационно-измерительной техники УГАТУ (Уфа). E-mail: yasov@mail.ru.

Хасанов М.М.

ПРИМЕНЕНИЕ ПРИСАДОК ИЗ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ В ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ УСИЛИТЕЛЯХ

В статье рассматриваются методы реализации различных вариантов волоконно-оптических усилителей с присадками из редкоземельных металлов. Описаны особенности их работы, такие как: рабочая полоса частот, рабочее окно прозрачности, условия расположения, мощность накачки и коэффициент усиления.

Ключевые слова: оптоволокно, мультиплексирование, эрбий, тулий, концентрация, активатор, фотон, лазер, спектр.

Khasanov M.M.

APPLICATION OF RARE-EARTH METAL ADDITIVES IN FIBER-OPTIC AMPLIFIERS

The article discusses the methods of implementation of various variants of fiber-optic amplifiers with additives made of rare earth metals. The features of their operation are described, such as: the operating frequency band, the operating transparency window, the location conditions, the pump power and the gain.

Keywords: optical fiber, multiplexing, erbium, thulium, concentration, activator, photon, laser, spectrum.

В процессе передачи оптических сигналов вдоль волоконных линий связи на большие расстояния, из-за таких процессов, как рассеяние и поглощение, которые приводят к ослаблению информационного сигнала, приходится использовать последовательно расположенные усилители-повторители. Существуют повторители двух типов: оптико-электронные, выполняющие преобразование свет – электрический сигнал – свет, и чисто оптические, которые в настоящее время приобрели большое распространение. В роли полностью оптических повторителей применяются волоконные усилители, использующие для своей работы явление вынужденной эмиссии в волокнах, которые активированы ионами редкоземельных металлов, а также рамановские усилители, которые используют нелинейно-оптический эффект вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) в волокнах.

Такие устройства служат для усиления оптических сигналов в сравнительно широком диапазоне частот, включающем десятки и даже сотни информационных каналов, которые мультиплексированы по длинам волн. Они не имеют чувствительности к скорости передачи данных вплоть до 100 Гб/с и могут работать со всеми имеющимися форматами передачи данных [1-3].

Варианты реализации эрбиевых волоконных усилителей

В последнее время наибольшее распространение получили усилительные устройства на основе волокна, активированного с помощью ионов эрбия Er^{3+} (erbium-doped fiber amplifier – EDFA) который позволяет эффективно усиливать сигналы в полосе спектра с наименьшим поглощением кварцевого стекла 1535...1565 нм, а также в полосе 1570...1610 нм [4].

В линиях передачи данных используются три типа эрбиевых волоконных усилителей (ЭВУ) [4,5]. В первом типе усилитель мощности располагается непосредственно сразу после системы мультиплексирования, суммирующей излучение от полупроводниковых лазеров, которые данное излучение генерируют на различных длинах волн и создают спектральные информационные каналы. Во втором типе линейный усилитель располагается в промежутках линий связи между регенераторами на расстоянии до 160 км для компенсации ослабления сигнала, которое возникает из-за затухания в оптоволокне. ВЛУ усиление доходит до 18...23 дБ.

В третьем типе предварительный усилитель располагается непосредственно перед самым демультиплексором по длинам волн и позволяет увеличить отношения сигнал/шум на входе электронных усилительных каскадов после оптоэлектронных детекторов, регистрирующих информационные сигналы на различных длинах волн. Усиление в ПУ достигает 18...23 дБ.

Оптическая накачка волокна реализуется на длинах волн 980 нм или 1480 нм, после чего излучение лазера при помощи оптического мультиплексора направляется в усилительное волокно. Энергия накачки поглощается через ионы эрбия, с помощью которых активировано кварцевое волокно, вводя их в состояние возбуждения. Само усиление осуществляется, когда сигнальный фотон с длиной волны 1550 нм запускает переход возбужденного иона эрбия в основное состояние с излучением аналогичного фотона на волны длиной в 1550 нм.

В процессе передачи большого количества информационных каналов, мультиплексированных по длинам волн (wave length-division

multiplexing – WDM), применяется расширенный диапазон частот, в котором затруднительно достичь равномерную частотную характеристику ЭВУ. Частотная зависимость создает большую проблему в линиях большой протяженности, в которых используются несколько последовательно расположенных друг за другом секций с ЭВУ между ними. Данный недостаток решается применением узкополосных сглаживающих оптических фильтров с целью ослабления сигналов на тех частотах, на которых построены большие коэффициенты усиления. Сглаженность частотной характеристики усиления достигается как правило достижением требуемых значений ряда параметров, таких как длины волокна, уровни входной мощности сигнала и накачки, и т.д. В однокаскадных усилителях сглаживание частотной характеристики создает либо потерю выходной мощности, либо дополнительное ослабление информационного сигнала до момента его усиления. В связи с этим для сглаживающих усилителей чаще используются многокаскадные схемы [4,5]. Спектральные кривые усиления многокаскадного эрбиевого усилителя приведены на рис. 1.

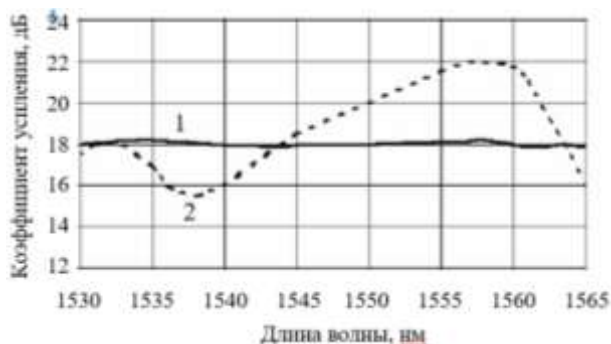


Рис. 1. Зависимости коэффициента усиления от длины волны многокаскадного эрбиевого усилителя: 1 – со сглаживающим фильтром; 2 – без сглаживающего фильтра

Обычно, в подобных устройствах применяется попутный лазер накачки на длине волны 980 нм в первом каскаде и встречный лазер накачки на длине волны 1480 нм – во втором, что исключает попадание лазерного излучения накачки на вход и выход сети передачи данных.

ЭВУ до недавнего времени были основным, видом волоконно-оптических усилителей при передаче данных на большие дистанции [4]. Необходимость в большей скорости передачи данных и количестве спектральных каналов требовали создания более совершенных технологий.

Реализация тулиевых волоконных усилителей

Другой разновидностью оптической системы усиления, построенной на основе волокна, активированного ионами редкоземельных элементов является оптические усилители на присадках тулия Ti^{3+} (thulium-doped fiber amplifier – TDFA). Они работают по принципу ЭВУ: оптическое усиление сигнала происходит в результате преобразования энергии накачки в энергию сигналов при распространении излучения в усилительном волокне [6,7]. Отличие между ЭВУ и тулиевыми волоконными усилителями (ТВУ) заключается в особенности усиления, определяемого ионами-активаторами и схемой накачки.

Спектральная кривая усиления тулиевого волоконного усилителя приведена на рис. 2.

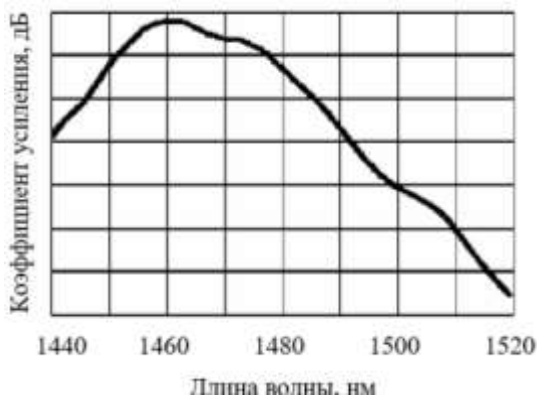


Рис. 2. Зависимость коэффициента усиления от длины волны тулиевого волоконного усилителя

Широкому распространению ТВУ мешает недостаточно высокая прочность применяемого в усилителе оптического волокна. Еще одной проблемой является обеспечение высокого качества соединения разных по физико-химическому составу волокна ТВУ и кварцевого волокна. По причине того, что сварка данных волокон

практически невозможна, применяется менее надежное механическое соединение торцов волокон, либо соединение на основе эпоксидной смолы. Данные соединения создают потери более 0,3 дБ, в отличие от потерь 0,05 дБ при способе со сваркой [7]. Также в состав волокна входит и цирконий, который приводит к высокой себестоимости производства. В настоящее время высокая стоимость и низкая надежность ТВУ не позволяют им широко распространяться.

Таким образом, усовершенствование ВОСП идёт и в направлении увеличения дальности расстояния между ретрансляторами путём использования более мощных лазеров, так и в направлении исследования эффективных технологий изготовления волоконных усилителей, легированных разными редкоземельными элементами.

Библиографический список

1. Назаров А.М., Гудкова Н.И., Хасанов М.М. Волоконно-оптические усилители, изготовленные в условиях вакуума. // Сб. докл. Респ. науч.техн. конф. молод. ученых, исслед-й, магистр. и студ. «Проблемы информационных технологий и телекоммуникаций», Ташкент, 2012. С. 91-93.
2. Randy G., Tingyc L.I. Signal amplifiers // Proc. IEEE, 1996, V. 84. P. 870-883.
3. Urquhart P. Data transmission formats // Proc. IEEE, 1988. V. 6. P. 385-407.
4. Trivedi D. A., Strite T., Gerlas van den Hoven. Absorption spectra // WDM solutions, 2000. № 4. P. 14-20.
5. Daniel C. McCarthy. Photonics Spectra // Optical amplifiers, 2001. № 7. P. 88-98.
6. Yvonne Carts-Powell. Pump energy // WDM solutions, 2001. № 7. P. 9, 20.
7. Islam M., Nietubyc M. Signal energy // WDM solutions, 2002. № 3. P. 53-62.

Сведения об авторах

Хасанов Миркомил Мирхидоят угли, старший преподаватель кафедры «Радиотехнические устройства и системы» ТашГТУ (Ташкент). E-mail: Khasanov.74@list.ru.

Юсупов Я.Т.

ОБЗОР СПОСОБОВ ОЦЕНИВАНИЯ СОСТОЯНИЯ РАДИОКАНАЛА

В статье рассматривается обзор способов оценивания состояния радиоканала, которые могут быть использованы в системах передачи информации для повышения их эффективности.

Ключевые слова: оценка параметров канала, вероятность ошибки на бит, способы оценивания радиоканала.

Yusupov Ya.T.

OVERVIEW OF METHODS FOR ASSESSING THE STATE OF A RADIO CHANNEL

The article discusses an overview of methods for assessing the state of a radio channel, which can be used in information transmission systems to improve their efficiency.

Key words: channel parameters estimation, bit error rate, radio channel estimation methods.

Необходимо отметить, что задача оценивания состояния радиоканала возникает при решении задачи оценивания качества связи. Достоверность, как известно, является одним из показателей качества связи.

Исторически так сложилось, что основным используемым показателем на протяжении долгого времени является значение отношения сигнал/помеха (ОСП). Этот факт можно объяснить тем, что данный показатель является единственным неизвестным параметром, при использовании в качестве модели канала связи модель канала с аддитивным белым гауссовским шумом, то есть канал с постоянными параметрами. Такая модель широко используется для описания каналов связи, где среда распространения не меняется или меняется чрезвычайно медленно, когда частотно избирательными свойствами можно пренебречь и, соответственно импульсная характеристика близка к дельта-функции Дирака. Также такая модель удобна для теоретического сравнения помехоустойчивости различных сигналов в одинаковых условиях. Несмотря на указанные особенности, наличие изме-

ренного значения ОСП позволяет получить грубую оценку состояния используемых радиоканалов и ранжировать их по этому показателю. То есть, имеется возможность оценить, какой канал лучше использовать, чтобы получить наименьшие искажения передаваемого сигнала. При развитии теорий помехоустойчивости, передачи дискретных сообщений и статистической радиофизики стало ясно, что использование показателя ОСП для каналов, где среда распространения может значительно изменять свои свойства за время проведения сеанса связи, становится нецелесообразным, так как получаемые оценки становятся слишком неточными и неадекватными действительному состоянию реального канала связи. Следствием такого понимания стало появление более сложных моделей канала, где стали учитываться, например, явления нестационарности, межсимвольной интерференции, частотной избирательности. Одновременно, актуальным стал вопрос получения оценок параметров таких моделей, иначе их наличие становилось бессмысленным. Стоит отметить, что сначала подавляющее число методов разрабатывалось для использования в низкоскоростных радиоприемах, где в основном применялась частотная (ЧТ) или амплитудная телеграфия (АТ). Однако, дальнейшее бурное развитие вычислительной техники и электронных компонентов позволило широко использовать фазовую (ФМ, ОФМ), амплитудно-фазовую (АФМ) и квадратурно-амплитудную (КАМ, QAM) модуляции, а также полностью занять по частоте выделенный канал связи с помощью сигналов с ортогональным частотным разнесением субканалов (OFDM) или ещё более плотной упаковки. Такие сигналы позволяют более эффективно использовать канал связи и достигать более высоких скоростей передачи данных. Применение таких сигналов требовало также соответствующих способов оценки состояния радиоканала, разработанных спустя некоторое время. В рассмотренных способах для получения искомой оценки производится анализ и обработка самого принимаемого сигнала, и их условно объединяют в группу способов оценки непрерывного канала.

Другим путем развития способов оценивания состояния радиоканалов стало появление отдельного направления, где главным показателем состояния стала вероятность приёма ошибочного бита сообщения, то есть ВОБ. Использование такого показателя становится удобным в тех случаях, когда в качестве модели канала связи можно использовать модель дискретного канала. Такая модель позволяет наглядно сравнивать исправляющую способность различных кодовых

конструкций, в зависимости от указанного показателя. При таком рассмотрении становится ясно, при использовании какой кодовой конструкции из некоторого доступного множества, сообщение, переданное по каналу связи, вероятнее всего исказится наименьшим образом. Способы, которые в качестве данных для получения оценки состояния канала используют биты сообщения, полученные с выхода демодулятора, условно объединяют в группу способов оценки дискретного канала. Можно смело утверждать, что одним из самых простых и очевидных способов оценивания радиоканала является *тестовый способ*. Его основная идея состоит в том, чтобы передать по каналу сигнал, который точно известен на приёмной стороне и, использовать определенным образом это знание для оценивания различных влияний и искажений, возникших при прохождении.

Для случая дискретного канала на приемной стороне осуществляется сравнение принятой последовательности бит с известной последовательностью и подсчет общего числа ошибок в ней с последующим делением этой суммы на общую длину принятой последовательности. При этом получаемая величина, которая называется частотой или коэффициентом ошибок является несмещенной оценкой истинного значения вероятности ошибки на бит (ВОБ). Такой способ описан в соответствующих стандартах связи и измерений [8] и реализован в действующей аппаратуре, разработанной для целей тестирования и измерения ошибок в линиях связи. Для случая непрерывного канала используют априорные знания о заданных на передающей стороне значениях частоты, амплитуды и начальной фазы на каждом временном отрезке сигнала и анализируют их отличие при приеме.

Такие способы используются в большом количестве реальных изделий, а также указаны в стандартах связи и измерений.

Гораздо более сложными для разработки являются *бестестовые способы*. Их основная идея состоит в том, чтобы во время приёма информационного сигнала, когда на приёмной стороне неизвестна передаваемая информация, оценить различные влияния и искажения, возникающие при прохождении сигнала. В большинстве случаев это удаётся сделать потому, что передаваемый сигнал строго соответствует некоторой модели. Таким образом, неизвестной является информация, а известным является общий вид сигнала и его параметры. Так, например, почти всегда известен вид и позиционность модуляции, длительность элементарной посылки сигнала, распределение мощности сигнала внутри занимаемой полосы, используемая кодовая

конструкция. Построение бестестовых способов становится возможным только благодаря таким априорным знаниям. Почти наверняка можно утверждать, что если о сигнале неизвестно ничего, то невозможно построить какой-либо бестестовый способ оценивания, собственно, как невозможно и достоверно получить информационные биты сообщения.

Описание бестестовых способов оценивания состояния радиоканала, применимых для ЧТ (частотная телеграфия) или АТ (амплитудная телеграфия) сигналов, построенных на основе анализа таких первичных параметров сигнала, как затухание амплитуды, фазовые флуктуации, временные искажения, частотные дрожания, искажения фронтов и дробления посылок можно найти, например, в [4]. Однако, зачастую, предлагаемые схемы предполагают наличие некоторых порогов, в соответствии с которым, канал можно считать либо годным, либо не годным для передачи данных. Также в соответствии с порогом может вырабатываться сигнал стирания некоторого символа. При этом, правило выбора оптимального значения порога является практически наиболее спорным вопросом и часто не указывается. Кроме того, для современных радиолиний передачи данных, в которых используются сигналы OFDM с ОФМ или КАМ такие способы не могут быть использованы. Более широкое распространение получили методы оценки статистических параметров радиолинии, на основе которых можно, по известным зависимостям найти оценку ВОБ для любого вида и позиционности модуляции.

В первую очередь стоит упомянуть *способы оценивания ОСП*. Такие способы годятся, если канал близок к модели канала с постоянными параметрами. Задаче оценивания значения ОСП посвящено достаточно много работ, однако, большая часть из них, основана на использовании различных тестовых сигналах и пилот-символах. Так, в работах [6] можно найти обзоры известных способов, когда используется фазовая модуляция, которые требуют знания передаваемой информации. Среди известных бестестовых способов можно выделить следующие.

Для случая, когда принимаемый сигнал представляет собой смесь одночастотного гармонического сигнала с любой фазой и амплитудой и шума также известны способы оценивания ОСП. Например, в работах [3] на основе анализа фазовых флуктуаций или девиации амплитудного спектра удаётся найти интересующую оценку. Однако, зависимости, на основании которых, получены оценки являются

эмпирическими и теоретически не обоснованы. В работе [2] представлен способ оценивания, который основан на анализе отличия сигнала и его второй производной. Однако, отмечено, что им можно пользоваться при малых значениях ОСП. Кроме того, опущена существенная сложность, состоящая в нахождении второй производной принимаемого зашумленного сигнала. В работе [1] представлен способ оценивания, который основан на структурном анализе принимаемого сигнала. Однако, он требует обязательной повторяемости частей принимаемого сигнала.

Для случая, когда принимаемый сигнал представляет собой смесь OFDM сигнала и шума известны способы оценивания ОСП. Данные способы основаны на использовании ЗИ OFDM сигнала, представляющего собой периодическое продолжение сигнала. Основная идея состоит в том, чтобы вычислить сумму и разность сигнала на этой длительности и, получить таким образом удвоенный шум или смесь удвоенного сигнала и удвоенного шума, а затем получить оценку ОСП. При этом, недостатками данных способов является то, что их точность существенно зависит от длительности ЗИ и импульсной характеристики канала связи. При отсутствии ЗИ такими способами воспользоваться не удаётся. В случае наличия замираний возникает задача оценивания нескольких неизвестных параметров модели замирания. Несмотря на наличие большого числа моделей замирания, удовлетворительные методы оценивания удаётся построить только для моделей, где количество таких параметров не больше двух.

Среди известных способов можно выделить следующие. *Способы оценивания неизвестных параметров распределения вероятностей Накагами и Райса.*

В работах [9] предлагается оценивать параметр m по выборке случайных величин (СВ), имеющих плотность распределения Накагами. В работах [5] предлагаются способы оценивания параметров распределения Райса. Основными методами, на основе которых предлагается получать искомые оценки, являются метод максимального правдоподобия (ММП) или метод моментов (ММ), широко используемые в статистических задачах. Однако, необходимо отметить, в данных работах не учитывается, что радиосигнал всегда принимается на фоне шума, который во многих случаях можно считать гауссовским, поэтому измеренные величины имеют плотность распределения, которая отлична от Накагами или Райса. В этом состоит сложность применения данных способов.

Известны также работы [7], в которых учтено наличие шума в принимаемом сигнале. Здесь также используются ММП или ММ, на основе полученных аналитических выражений для плотности распределения огибающей зашумлённого замирающего сигнала. На практике, однако, достаточно часто не удаётся получить путём измерений выборку значений огибающей смеси сигнала и помехи, с найденным законом распределения. Причиной этому служит наличие блока автоматической регулировки усиления (АРУ) в приёмной аппаратуре. Такой блок необходим для максимально эффективного использования аналого-цифрового преобразователя, когда уровень принимаемого сигнала, поступающего с антенны может значительно меняться в течении сеанса связи. Поскольку коэффициент усиления АРУ чаще всего неизвестен и динамически меняется в процессе измерений, то статистические характеристики выборочной плотности распределения огибающей принимаемого сигнала значительно меняются, и восстановить истинную плотность распределения огибающей известным образом не удаётся. Таким образом, недостатком данных способов является то, что ими нельзя пользоваться при наличии АРУ. Кроме того, известны также *бестестовые способы оценивания ВОБ*, основанные на оценке дискретного канала. Такие способы могут быть применены для сигналов любого вида, при условии использования соответствующей схемы кодирования или введения дополнительной избыточности. Среди известных способов можно выделить следующие.

Способы на основе оценивания анализа успешных и ошибочных приёмов блоков со скользящим или фиксированным окном наблюдения различной длины. В таких способах предлагается оценивать состояние канала связи по числу сигналов переспроса с последующим сравнением этого числа с пороговым значением. Такие способы могут быть использованы в радиолиниях с автоматическим переспросом. Недостатком данных способов является то, что для получения оценки необходимо набрать некоторую статистику переспросов, что может занять достаточно длительное время. Так, для КВ радиолиний это время может составить единицы минут, а условия распространения могут измениться за единицы секунд.

Косвенные способы оценивания верности дискретного канала по результатам декодирования кодовых комбинаций. В таких способах предлагается оценивать состояние канала связи по частоте появления нулевого или ненулевого синдрома. Однако, как утверждается, полученные выражения являются не точными, а приближёнными, и

полученная оценка имеет методическую погрешность. По результатам анализа публикаций, можно также сделать вывод, что часто для получения оценки состояния канала связи используются приближённые формулы, а затем для корректировки результата используются поправочные коэффициенты. Такой подход заведомо является необоснованным с научной точки зрения.

Библиографический список

1. Котлова, Т.В. Исследование процедуры совместного обнаружения сигнала, оценивания дисперсии шума и тактовой синхронизации в многолучевом канале / Т.В. Котлова, Р.Р. Халилов // Инфокоммуникационные технологии. – 2010. – Том 8. – № 2. – С. 11-14.
2. Останин, С.А. Метод измерения малых значений дисперсии белого шума в смеси с гармоническим сигналом / С.А. Останин // Известия Алтайского государственного университета. – 2011. – Том 69. – вып. 1-1. – С. 174-175.
3. Персичкин, А.А. Измерение отношения сигнал/шум смеси гармонического сигнала и узкополосного шума / А.А. Персичкин, А.А. Шпилевой // Вестник Балтийского федерального университета им. И.Канта. – 2012. – вып. 10. – С.126-130.
4. Рожков, И.Т. Синтез измерителей отношения сигнал/помеха принимаемых радиосигналов / И.Т. Рожков. – Саратов: Изд-во Саратов. Ун-та, 1990. – 166 с.
5. Abdi, A. On the estimation of the parameter for the Rice fading distribution / A. Abdi, C. Tepedelenlioglu, G.B. Giannakis // IEEE Commun. Lett. – 2001. – V. 5. № 3. – P. 92.
6. Beaulieu, N.C. Comparison of four SNR estimators for QPSK modulations / N.C. Beaulieu, A.S. Toms, D.R. Pauluzzi // IEEE Commun. Lett. – 2000. – V. 4. № 2. – P. 43–45.
7. Chen, Y. Estimation of Ricean K parameter and local average SNR from noisy correlated channel samples / Y. Chen, N.C. Beaulieu // IEEE Trans. on Wireless Commun. – 2002. – V. 6. – № 2. – P. 640.
8. MIL-STD-188-190. Methods for communications systems measurements. – United States Department of Defense Interface Standard, 1990.
9. Zhang, Q. T. A note on the estimation of Nakagami- m fading parameter / Q.T. Zhang // IEEE Commun. Lett. – 2002. – V. 6. № 6. – P. 237.

Сведения об авторах

Юсупов Ярашбек Тохирбаевич, старший преподаватель ТГТУ имени Ислама Каримова (Ташкент). E-mail: yarashbekyusupov@mail.ru.

Якимов В.Н., Ибатов Р.Ш.

**ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ И ОПЕРАТИВНОСТИ УЧЕТА
НЕФТЕПРОДУКТОВ ПРИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ОПЕРАЦИЯХ НА НЕФТЕБАЗАХ**

Рассмотрена автоматизированная система для диспетчерского управления и контроля операциями слива и налива нефтепродуктов. Целью разработки системы является внедрение методики, обеспечивающей снижение погрешности измерений при приеме, хранении и отпуске нефтепродуктов. Система построена по иерархическому принципу управления.

Ключевые слова: нефтепродукты, нефтебаза, автоматизированная система управления, операции слива и налива.

Yakimov V.N., Ibatov R.Sh.

**IMPROVING THE ACCURACY AND EFFICIENCY OF
ACCOUNTING FOR PETROLEUM PRODUCTS DURING
TECHNOLOGICAL OPERATIONS AT OIL DEPOTS**

An automated system for dispatching control and monitoring of operations of unloading and loading of oil products is considered. The purpose of developing the system is to introduce a methodology that reduces the error of measurement results during the reception, storage and release of petroleum products. The system is built on a hierarchical management principle.

Keywords: petroleum products, oil depots, automated control system, loading and unloading operations.

Российская Федерация занимает одно из лидирующих мест в мире по добыче сырой нефти. Она обладает девятью процентами всех мировых запасов нефти. Вследствие этого нефтегазовый сектор играет важную роль в экономике Российской Федерации.

Одной из важнейших задач после переработки нефти является хранение готовых нефтепродуктов на нефтебазах. Осуществлять прием и отпуск нефтепродуктов нефтебазы должны только через специальные сливоналивные устройства. При этом в процессе выполнения

таких операций основной задачей для нефтебаз является определение количества нефтепродуктов. Учет массы нефтепродуктов осуществляется по весу в килограммах и тоннах. Однако достоверно определить его в большинстве случаев проблематично. Это объясняется тем, что в современной нефтяной отрасли учет массы светлых нефтепродуктов в основном осуществляется косвенным способом. Кроме того существующие на нефтебазах методики определения технологических потерь при приёме и отпуске нефтепродуктов дают искаженные результаты измерений. В дополнении к этому погрешность средств измерения при хранении нефтепродуктов не позволяет фиксировать малые расходы в резервуарах.

На практике в зависимости от поступления и отпуска нефтепродуктов существует несколько способов учета их массы [1-4].

1) При поступлении нефтепродуктов по трубопроводу могут использоваться счетчики объема. Тогда масса поступивших нефтепродуктов будет определяться расчетным путем. Масса нефтепродуктов может также определяться непосредственно путем проведения замеров в приемных резервуарах в процессе поступления продукция.

2) При выполнении слива нефтепродуктов из железнодорожных цистерн масса определяется с помощью калибровочных таблиц, которые составляются для каждого тип цистерн.

3) При сливе нефтепродуктов из автомобильных цистерн масса определяется на основе данных об уровне перелива/недолива в горловине цистерны, а также на основе паспортов на каждую секцию принимаемой автоцистерны с указанием полного объема и диаметра горловины.

При выполнении налива (отпуска) в автомобильные или железнодорожные цистерны масса нефтепродуктов определяется с использованием счетчиков объема расчетным путем. Для оперативного определения уровня наполнения могут использоваться метроштоки. Также могут использоваться градуировочные таблиц с корректировкой по плотности и температуре отпускаемых нефтепродуктов. Однако последний подход требует выполнения нескольких последовательных операций: замер уровня наполнения цистерны, измерение уровня перелива/недолива, замер температуры и плотности нефтепродукта и т.д. Это приводит к дополнительным затратам время на обработку данных измерений и увеличивает погрешность измерения массы отпуска нефтепродуктов. На некоторых объектах

отпуска нефтепродуктов применяются технологии, связанные с взвешиванием груженых и порожних автомобильных или железнодорожных цистерн. Здесь существует проблема соответствия типоразмера весов и их размещения на территории нефтебазы. Завышенная грузоподъемность весов приводит к увеличению погрешности взвешивания нефтепродуктов. Для данного способа нормативная погрешность измерений массы нефтепродуктов составляет [2]:

- 1) для расцепленных железнодорожных цистерн и автоцистерн 0,40 %;
- 2) для движущихся сцепленных железнодорожных цистерн и автоцистерн 0,50 %.

Для решения проблемы оперативного учета массы нефтепродуктов разработана автоматизированная система. Основу технического решения системы составляет использование массовых кориолисовых счетчиков-расходомеров. В этом случае достигается снижение погрешности измерения до 0,25 % по массе, 0,25 % по объему, $0,5 \text{ кг/см}^3$ по средней плотности продукта и $0,5^\circ\text{C}$ средней температуры. Особенности и преимуществом данного подхода к процессу измерения является:

- 1) отсутствие дополнительных погрешностей ввиду прямого измерения массового расхода нефтепродуктов в трубопроводе;
- 2) надежная работа за счет отсутствия влияния на результаты измерений таких факторов, как вибрации трубопровода и перекос труб;
- 3) отсутствие в расходомере движущихся частей и деталей, подверженных износу, что продлевает срок службы расходомера;
- 4) минимальное гидравлическое сопротивление за счет отсутствия в проточной части расходомера препятствий для потока;
- 5) отсутствие необходимости в прямолинейных участках трубопровода до и после расходомера, а также в устройствах подготовки потока.

Контролирование технологических процессов при приеме (отпуске) нефтепродуктов осуществляются с использованием специализированного программного обеспечения АРМ с интеллектуальными свойствами, работа которого предполагает установление формального порядка выполнения операций с данными текущих измерений и накопленными знаниям по обработке данных в предшествующие периоды. Эта задача решается на основе эксплицирования и фиксации в базе знаний информации по данной предметной области

[5-8]. Процедуры обработки результатов данных измерений организованы согласно иерархической модели классов, связи внутри которой структурированы так, чтобы осуществлять логический вывод на основе перехода от общего к частному при выполнении вычислительных операций и обратно в процессе формализации и накопления знаний. Выделение фактов измерений основано на описании предметной области вида «объект – атрибут – действие». Такой подход обеспечил представление знаний о предметной области измерений как набор правил, каждое из которых состоит из двух частей: антецедента и консеквента, или условия и результата. Эта концепция позволила перейти к системной организации продукционных правил. Интегрирование модели представления знаний с продукционными системами учитывает взаимодействие причинно-следственных действий при выполнении обработки данных.

Система в автоматизированном режиме работы реализует непрерывную передачу данных измерений на АРМ оператора и обеспечивает учет каждой отпущенной партии нефтепродуктов, что снижает влияние человеческого фактора на процесс измерения [9].

АРМ позволяет оператору одновременно контролировать прием и отпуск по разным брендам нефтепродуктов. При этом ведется журнал событий, позволяющий в любой момент времени восстановить хронологию приема и отпуска нефтепродуктов и действий оператора.

АРМ позволяет дополнительно выполнять:

- 1) оперативную регулировку расхода и поддержание постоянной производительности насосов;
- 2) корректировку расхода для конкретного технологического трубопровода объекта, с учетом высоты взлива в резервуаре;
- 3) минимизацию гидроударов и увеличения точности дозирования.

Передача информативных данных измерений и их статистическая обработка осуществляется на основе бинарно-знакового стохастического квантования. Данный вид квантования реализует процедуру двухуровневого квантования без систематической погрешности. Результат бинарно-знакового стохастического квантования представляет собой непрерывный во времени и ограниченный по уровню значениями «-1» и «+1» знаковый (телеграфный) сигнал. При этом носителями информации являются длительности интервалов времени, определяемые сменой

текущих значений знакового сигнала [10-11]. Использование такого вида сигнала обеспечивает повышенную помехозащищённость передачи и обработки данных.

Разработанная система может найти применение при модернизации и проектировании различных объектов нефтяной отрасли.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-08-00228 А).

Библиографический список

1. МИ 2440-97 ГСОЕИ. Методы экспериментального определения и контроля характеристик погрешности измерительных каналов измерительных систем и измерительных комплексов. Зарегистрирован ВНИИМС 29.12.97. Москва, 1999. 25 с.

2. ГОСТ 8.587-2019 ГСОЕИ. Масса нефти и нефтепродуктов. Методики (методы) измерений. Введ. 2020-14-30. М.: Стандартинформ, 2019. 51 с.

3. ГОСТ 1510-84 Нефть и нефтепродукты. Маркировка, упаковка, транспортирование и хранение. Введ. 1986-01-01. М.: Стандартинформ, 2010. 34 с.

4. ГОСТ 34569-2019 Магистральный трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. Устройства сливо-наливные нефти и нефтепродуктов. Общие технические условия. Введ. 2020-06-01. М.: Стандартинформ, 2019. 28 с.

5. Якимов В.Н., Дьяконов Г.Н., Машков А.В. Формирование онтологии предметной области на основе анализа NFL-континуума // Информационные технологии. 2006. № 3. С. 36-39.

6. Артюшкин И.В., Рогачев Г.Н., Якимов В.Н., Ярославкина Е.Е. Нейросетевая система автоматизированного управления процессом термохимического обезвоживания нефтяных эмульсий // Нефтяное хозяйство. 2019. № 6. С. 102-105.

7. Маслаков М.А., Якимов В.Н. Процессно-ориентированные информационные системы // Автоматизация и современные технологии. 2009. № 11. С. 17-22.

8. Якимов В.Н., Филимонов А.Б. Распределенная автоматизированная информационная система мониторинга технологических процессов транспортировки, переработки и хранения нефти и газа // Сборник докладов Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям. Санкт-Петербург: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2008. Т.2. С.39-42.

9. Якимов В.Н., Ибатов Р.Ш. Оперативное измерение и определение массы светлых нефтепродуктов при выполнении операций слива и налива // В сборнике: Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации («Шляндинские чтения – 2020»). Материалы XII Международной научно-технической конференции. Под ред. Е.А. Печерской. Пенза, 2020. С. 177-180.

10. Якимов В.Н. Цифровой комплексный статистический анализ на основе знакового представления случайных процессов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. Т. 18. № 4-7. С. 1346-1353.

11. Якимов В.Н. Обобщенная математическая модель двухуровневого знакового преобразования // Техника машиностроения. 2000. № 4. С. 72-74.

Сведения об авторах

Якимов Владимир Николаевич, доктор технических наук, профессор Самарского государственного технического университета (СамГТУ). E-mail: yvnr@hotmail.com.

Ибатов Руслан Шамилевич, ведущий инженер-проектировщик контрольно-измерительных приборов и автоматики (КИПиА), ЗАО «Нефтебазстрой». E-mail: ruslanib1687@gmail.com.

УДК 519.246.27

Якимов В.Н.

ОЦЕНКА РЕЗОНАНСНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ЧАСТОТНОГО СПЕКТРА НА ОСНОВЕ МЕТОДА ПЕРИОДОГРАММ И БИНАРНО-ЗНАКОВОГО СТОХАСТИЧЕСКОГО КВАНТОВАНИЯ

Рассмотрено математическое обеспечение для расчета резонансных частот. Разработка осуществлена на основе периодограммного метода оценивания спектральной плотности мощности и бинарно-знакового квантования анализируемого сигнала. Полученные математические решения могут быть непосредственно реализованы в виде программного модуля.

Ключевые слова: резонансная частота, спектральный максимум, спектральная плотность мощности, бинарное стохастическое квантование.

Yakimov V.N.

**RESONANCE COMPONENTS ESTIMATION OF THE
FREQUENCY SPECTRUM BASED ON PERIODOGRAM
METHOD AND BINARY-SIGN STOCHASTIC QUANTIZATION**

The mathematical support for calculating the resonance frequencies has been developed. This development was carried out on the basis of the periodogram method for estimating the power spectral density and binary-sign quantization of the analyzed signal. The obtained discrete-analytical solutions can be directly implemented as a software module.

Keywords: resonance frequency, spectral maximum, spectral power density, binary stochastic quantization.

Принципиально важной задачей проведения вибрационной диагностики технических систем является экспериментальное исследование частотного состава колебательных процессов. На основе результатов таких исследований определяются частотные области резонансных пиков (максимумов огибающей частотного спектра), которые характеризуются резонансной частотой и их спектральной шириной [1]. Локализация и оценка параметров резонансных пиков может осуществляться непосредственно по частотному спектру наблюдаемой реализации сигнала. При этом в настоящее время для оценки частотного спектра преимущественно используются цифровые подходы. Это объясняется двумя основными причинами. Во-первых, цифровая инженерия позволяет создавать высокотехнологичные измерительные системы. Во-вторых, цифровой спектральный анализ обеспечивает воспроизводимость, повторяемость и вычислительную точность обработки дискретных значений сигналов. Однако, как правило, цифровое кодирование сигнала осуществляется на основе многоуровневого аналого-цифрового преобразования. Это приводит к тому, что в процессе цифровой обработки многообразных отсчетов сигнала алгоритмы вычисления оценок частотного спектра требуют выполнения значительного объема вычислительных операций, в том числе и операций цифрового умножения.

Таким образом, целью и задачей настоящей работы является получение дискретно-аналитического решения, которое позволяло бы

синтезировать цифровые алгоритмы, обеспечивающие снижение вычислительных затрат при обработке сигналов в процессе локализации резонансных пиков и оценки их частотных характеристик.

При обработке сигналов в большинстве практических случаев имеет место статистическая неопределенность измерений. Сигналы также могут подвергаться внешним зашумлениям. Частотный анализ таких сигналов будет связан с оцениванием спектральной плотности мощности (СПМ). Она характеризует распределение средней мощности сигнала, которая приходится на единичный интервал частоты [2].

По своему определению СПМ является непрерывной функцией $S_{XX}(f)$ частоты f . Исходя из этого, разложим СПМ в окрестности резонансной частоты F_m в степенной ряд Тейлора. При этом ограничимся первыми тремя членами и учтем, что значения первой производной в точках экстремумов будут равны нулю, т.е. $S'_{XX}(F_m) = 0$. В соответствии с этим будем иметь:

$$S_{XX}(f) = S_{XX}(F_m) + \frac{1}{2} S''_{XX}(F_m)(f - F_m)^2, \text{ где } m = 1, 2, 3, \dots M. \quad (1)$$

Соотношение (1) представляет собой полное квадратное уравнение относительно частоты f . Вычисляем корни этого уравнения и получаем, что оценки нижней и верхней границ резонансных пиков в спектре сигнала будут определяться следующим образом:

$$\left\{ \begin{matrix} f_{Lo,m} \\ f_{Hi,m} \end{matrix} \right\} = F_m \mp \sqrt{2 \frac{S_{XX}(f_{Lo,m}) - S_{XX}(F_m)}{S''_{XX}(F_m)}}. \quad (2)$$

В предельном случае будем считать, что $S_{XX}(f_{Lo,m}) = S_{XX}(f_{Hi,m}) = 0$. Тогда с учетом, того, что вторая производная функции в точке максимума имеет отрицательное значение, т.е. $S''_{XX}(F_m) < 0$, получаем:

$$\left\{ \begin{matrix} f_{Lo,m} \\ f_{Hi,m} \end{matrix} \right\} = F_m \mp \sqrt{2 \frac{S_{XX}(F_m)}{|S''_{XX}(F_m)|}}. \quad (3)$$

Оценка ширины полосы частот будет равна:

$$\Delta f_m = f_{Hi,m} - f_{Lo,m} = 2 \sqrt{2 \frac{S_{XX}(F_m)}{|S''_{XX}(F_m)|}}. \quad (4)$$

Как следует из (2)-(3), решение поставленной задачи свелось к разработке дискретно-аналитического решения, обеспечивающего

снижения вычислительных затрат при оценке СПМ и её второй производной.

Повышение производительности цифровых вычислений может быть достигнуто за счет снижения разрядности обрабатываемых отсчетов сигнала. Обеспечить эффективность такого подхода позволяет бинарно-знаковое стохастическое квантование сигнала [3]. Основу данного вида квантования составляет процедура рандомизации, которая заключается в использовании вспомогательного случайного сигнала $\xi(t)$ в качестве пороговой функции. При этом вспомогательный сигнал $\xi(t)$ должен иметь равномерное распределение и изменяться в пределах от $-\xi_{\max}$ до $+\xi_{\max}$, где значение величины $\xi_{\max}$ определяется исходя из динамического диапазона значений анализируемого сигнала $x(t)$. В общем виде бинарно-знаковое стохастическое квантование представляет собой следующую процедуру [3,4]:

$$z(t) = +1, \text{ если } x(t) \geq \xi(t); \quad z(t) = -1, \text{ если } x(t) < \xi(t). \quad (5)$$

Широко применяемым методом оценивания СПМ является периодограммный метод, когда оценку СПМ вычисляют на интервале времени T на основе финитного преобразования Фурье центрированной реализации сигнала $\overset{o}{x}(t)$. Вследствие перехода к бинарно-знаковому стохастическому квантованию периодограммную оценку СПМ будем искать в следующем виде:

$$\hat{S}_{xx}(f) = \xi_{\max}^2 T^{-1} |F_{zz}(f)|^2 = \xi_{\max}^2 T^{-1} (\text{Re}^2[F_{zz}(f)] + \text{Im}^2[F_{zz}(f)]), \quad (6)$$

$$F_{zz}(f) = \int_0^T z(t) \exp(-j2\pi ft) dt.$$

Результат бинарно-знакового стохастического квантования $z(t)$ принимает значения « -1 » и « $+1$ ». Исходя из этого в [4,5] рассмотрена дискретно-событийная модель изменения его значений во времени. Согласно этой модели для $z(t)$ достаточно знать значение $z(t_0)$ в начальный момент времени квантования $t_0 = 0$ и отсчеты времени $\{t_i^Z : 1 \leq i \leq (I-1)\}$, в которые на интервале времени анализа $T = t_I^Z$ происходит смена его текущих значений. С учетом этой модели в [6,7] разработаны эффективные в вычислительном отношении дискретно-аналитические решения для вычисления частотного спектра.

Адаптированный к рассматриваемой задаче вариант этих решений для $f_k = k\Delta f$, где $\Delta f = 1/T$ разрешение по частоте, имеет вид:

$$\operatorname{Re}[F_{ZZ}(f_k)] = -\frac{z(t_0)}{\pi f_k} \sum_{i=1}^{I-1} (-1)^i \sin 2\pi f_k t_i^Z, \quad (7)$$

$$\operatorname{Im}[F_{ZZ}(f_k)] = \frac{z(t_0)}{\pi f_k} \left(\frac{1+(-1)^I}{2} + \sum_{i=1}^{I-1} (-1)^i \cos 2\pi f_k t_i^Z \right). \quad (8)$$

Теперь с учетом (7) и (8), после выполнения операции двойного дифференцирования оценки СПМ (6), получаем математические соотношения для вычисления оценки ее производной второго порядка:

$$\hat{S}_{XX}''(f_k) = \xi_{\max}^2 \sum_{m=1}^3 A_m(f_k), \quad (9)$$

$$A_1(f_k) = \frac{T^3}{4k^4 \pi^2} \sum_{i=0}^I \sum_{j=0}^I (-1)^{i+j} \lambda_{i,j} \cos 2\pi f_k \Delta t_{i,j}, \quad (10)$$

$$A_2(f_k) = \frac{2T^2}{k^3 \pi} \sum_{i=0}^I \sum_{j=0}^I (-1)^{i+j} \lambda_{i,j} \Delta t_{i,j} \sin 2\pi f_k \Delta t_{i,j}, \quad (11)$$

$$A_3(f_k) = -\frac{T}{k^2} \sum_{i=0}^I \sum_{j=0}^I (-1)^{i+j} \lambda_{i,j} \Delta t_{i,j}^2 \cos 2\pi f_k \Delta t_{i,j}. \quad (12)$$

$$\lambda_{i,j} = \begin{cases} 1, & i = j = 0, i = j = I; \\ 2, & i = 0, i = I, 1 \leq j \leq I-1; 1 \leq i \leq I-1, j = 0, j = I; \\ 4, & 1 \leq j \leq I-1, 1 \leq i \leq I-1. \end{cases}$$

$$\Delta t_{i,j} = t_j^Z - t_i^Z.$$

Полученные дискретно-аналитические решения определяют вычислительный алгоритм практической реализации предложенного подхода к локализации резонансных пиков. В обобщенном виде такой алгоритм представляет собой совокупность следующих вычислительных процедур: 1) вычисление оценок $\hat{S}_{XX}(f_k)$ и их анализ с целью нахождения частот F_m ; 2) вычисление оценок $\hat{S}_{XX}''(F_m)$; 3) вычисление $f_{Lo,m}$, $f_{Hi,m}$ и Δf_m . При этом вычисление оценок $\hat{S}_{XX}(f_k)$ не

приводит к многочисленным операциям умножения, что снижает мультипликативную сложность соответствующей процедуры. Это следует из (7) и (8). Вычисление оценок $\hat{S}_{XX}''(f_k)$ требует выполнения операций умножения вида $\Delta t_{i,j} \sin 2\pi f_k \Delta t_{i,j}$ и $\Delta t_{i,j}^2 \cos 2\pi f_k \Delta t_{i,j}$.

Однако оценки $\hat{S}_{XX}''(f_k)$ вычисляются только для частот F_m , что осуществляется ограниченное число раз. Все перечисленные вычислительные процедуры могут выполняться параллельно по мере готовности исходных и промежуточных данных. Полученные дискретно-аналитические решения идентичны по своей структурной организации, что обеспечивает однородность их метрологических характеристик. На практике они могут быть реализованы в виде функционально-самостоятельного программного модуля.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-08-00228 А).

Библиографический список

1. ГОСТ 30630.1.2-99 Методы испытаний на стойкость к механическим внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Испытания на воздействие вибрации. Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. 2000. 27 с.
2. Marple Jr.S.L. Digital Spectral Analysis with Applications: Second edition. Dover Publications Inc. 2019. 432 p.
3. Мирский, Г.Я. Характеристики стохастической взаимосвязи и их измерения. М.: Энергоиздат, 1982. 320 с.
4. Якимов В.Н. Обобщенная математическая модель двухуровневого знакового преобразования // Техника машиностроения. 2000. № 4. С. 72-74.
5. Якимов В.Н. Цифровой комплексный статистический анализ на основе знакового представления случайных процессов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. Т. 18. № 4-7. С.1346-1353.
6. Якимов В.Н., Машков А.В., Горбачев О.В. Цифровой гармонический анализ на основе метода усреднения Фурье-преобразования псевдоансамбля сегментов знакового сигнала // Цифровая обработка сигналов. 2016. № 2. С. 31-34.

7. Якимов В.Н., Горбачев О.В. Программно-аппаратное обеспечение системы оценки амплитудного спектра многокомпонентных процессов // Приборы и техника эксперимента. 2013. № 5. С. 49-55.

Сведения об авторах

Якимов Владимир Николаевич, доктор технических наук, профессор Самарского государственного технического университета (СамГТУ). E-mail: yvnr@hotmail.com.

УДК 621.37

Ясовеев В.Х., Шмелев А.А., Мухаметова Г.З.

РАСЧЕТ ПОПРАВОЧНОГО КОЭФИЦИЕНТА ДЛЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО МАГНИТОСТРИКЦИОННОГО ДАТЧИКА ЛИНЕЙНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ МЕТОДОМ КУБИЧЕСКИХ СПЛАЙНОВ

В данной работе описан принцип работы магнитострикционного преобразователя линейных перемещений (МПП). Выведен поправочный коэффициент для коррекции расчета параметров перемещения в зависимости от внешних дестабилизирующих факторов.

Ключевые слова: магнитострикционный преобразователь перемещений, математическая модель, температура, поправочный коэффициент, упругие напряжения.

Yasoveev V.Kh., Shmelev A.A., Mukhametova G.Z.

CALCULATION OF THE CORRECTION FACTOR BY THE CUBIC SPLINE METHOD FOR AN INTELLIGENT MULTIFUNCTIONAL MAGNETOSTRICTIONAL LINEAR DISPLACEMENT SENSOR TAKING INTO ACCOUNT THE INFLUENCE OF EXTERNAL FACTORS

This paper describes the principle of operation of a magnetostrictive linear displacement transducer (MPT). A correction factor has been derived for correcting the calculation of the parameters of displacement from external destabilizing factors.

Key words: magnetostrictive displacement depending on external destabilizing factors.

Магнитострикционные преобразователи линейных перемещений (МПП) применяются во множествах отраслях современной промышленности. Являясь частью системы автоматического регулирования, магнитострикционные преобразователи линейных перемещений решают множество задач и обеспечивают высокую точность полученных результатов. МПП отличаются широкой областью возможного применения, низкой себестоимостью, простотой конструкции, высоким быстродействием и разрешающей способностью. Принцип работы МПП основан на магнитострикционном эффекте, который проявляется в ферромагнитных сплавах при воздействии двух магнитных полей, которые вызваны возбуждающим импульсом тока, протекающего по волноводу и магнитного поля постоянного магнита. В месте воздействия двух магнитных полей образуется механическая деформация, которая вызывает ультразвуковую волну [8]. На этот процесс в большей степени оказывают влияние внешние дестабилизирующие факторы, такие как растягивающее усилие P_x и температура T [2, 4, 6]. Следовательно, необходимо учитывать этих факторы при построении математической модели МПП.

Для совершенствования математической модели МПП необходимо введение поправочного коэффициента, учитывающего влияние дестабилизирующих факторов, таких как изменение упругих напряжений и температуры.

Приведем расчет поправочного коэффициента методом кубических сплайнов. На рисунке 1 представлена осциллограмма информационного сигнала МПП. Красным выделен информационный импульс, который необходимо зарегистрировать для дальнейшего расчета перемещения [8]. Под воздействием внешних дестабилизирующих факторов происходит изменение амплитуды сигнала, что сказывается на точности измерения. Для улучшения расчетных характеристик магнитострикционных датчиков линейных перемещений и их калибровки необходимо построить математическую модель, использование которой позволяет значительно сократить время на данные операции. Для применения математической модели информационного сигнала МПП в процессе настройки датчиков линейных перемещений необходимо производить коррекцию моделируемого сигнала в зависимости от внешних дестабилизирующих факторов. Для этого необходимо произвести расчет поправочного коэффициента по экспериментальной зависимости амплитуды информационного сигнала

МПП от внешнего фактора (таких как температура или растягивающее усилие).

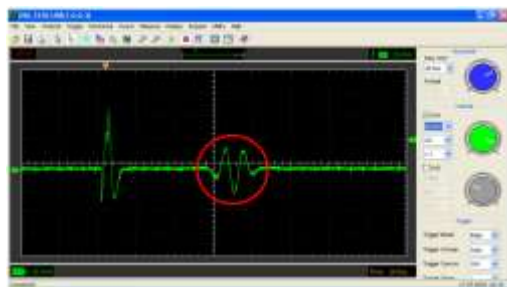


Рис. 1. Сигнал с реального МПП при нормальных условиях

На рисунке 2 представлена зависимость амплитуды (U) информационного сигнала МПП от внешних факторов, таких как температура (T) и растягивающее усилие (P). Согласно этой зависимости происходит расчет поправочного коэффициента по каждому фактору (температура ($X=T$) или растягивающее усилие ($X=P$)). Для расчета поправочного коэффициента используем метод кубических сплайнов [1, 5].

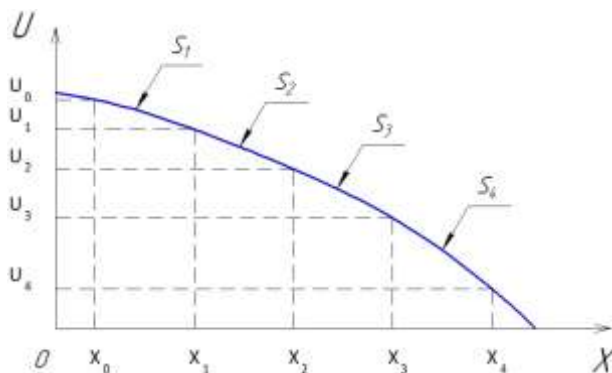


Рис. 2. Зависимость амплитуды информационного сигнала МПП от внешних факторов (температура или растягивающее усилие)

Предположим, что дано разбиение значений внешних факторов X на участки:

$$[x_{i-1}; x_i], \quad i = 1, 2, 3, 4.$$

Пусть шаг разбиения равен: $h_i = x_i - x_{i-1}$, $i = 1, 2, 3, 4$.

Построим кубический сплайн,

$$S_i(x) = a_i + b_i(x - x_i) + \frac{c_i}{2}(x - x_i)^2 + \frac{d_i}{6}(x - x_i)^3,$$

x принадлежит $[x_{i-1}; x_i]$, $i = 1, 2, 3, 4$,

который будет описывать поведение амплитуды информационного сигнала, в зависимости от внешних факторов. Согласно теории сплайнов [3], определим следующие понятия,

$$U(x, y, z) = \frac{U(y, z) - U(x, y)}{z - x},$$

$$U(x, y) = \frac{U(y) - U(x)}{y - x}.$$

Затем составим систему линейных уравнений,

$$\begin{cases} 2C_1 + \frac{h_2}{h_1 + h_2}C_2 = 6U(x_0, x_1, x_2), \\ \frac{h_2}{h_2 + h_3}C_3 + 2C_2 + \frac{h_3}{h_2 + h_3}C_3 = 6U(x_1, x_2, x_3), \\ \frac{h_3}{h_3 + h_4}C_2 + 2C_3 + \frac{h_4}{h_3 + h_4}C_3 = 6U(x_2, x_3, x_4), \end{cases}$$

Решив систему, находим значения коэффициентов c_1, c_2, c_3 .

Используя теорию сплайнов [3], находим искомые коэффициенты для $S_i(x)$ по следующим формулам:

- 1) $c_0 = 0, c_4 = 0$;
- 2) $b_1 = \frac{c_1 h_1}{3} + u(x_0, x_1)$;
 $b_i = \frac{c_i h_i}{3} + \frac{c_{i-1} h_i}{6} + u(x_{i-1}, x_i), \quad i = 2, 3, 4$;
- 3) $d_1 = \frac{c_1}{h_1}$;
 $d_i = \frac{c_i - c_{i-1}}{h_i}, \quad i = 2, 3, 4$;
- 4) $a_i = u(x_i), \quad i = 1, 2, 3, 4$.

Таким образом, получены значения коэффициентов сплайна, $a_i, b_i, c_i, d_i, \quad i = 1, 2, 3, 4$.

Построим искомый сплайн:

$$S_i(x) = F(x, x_i).$$

Составим следующее соотношение:

$$K = \frac{S_i(x)}{S_1(x_0)}.$$

Данная формула представляет собой поправочный коэффициент для информационного сигнала МПП зависимости от внешних дестабилизирующих факторов.

Значение амплитуды информационного сигнала рассчитывается согласно следующей формулы:

$$U(x) = U(x_0) \times K.$$

Выведенный поправочный коэффициент позволяет использовать более точную математическую модель информационного сигнала МПП, что обеспечивает уменьшение погрешности преобразования магнитострикционных датчиков линейных перемещений на момент настройки [6, 7, 9].

Библиографический список

1. Волков Е.А. Численные методы. М.: Наука. 1987. 248 с.
2. Захаров В.Н. Интеллектуальные системы управления: основные понятия и определения. Известия Академии наук. Теория и системы управления. 1997. № 3. С. 138-145.
3. Костомаров Д.П., Фаворский А.П. Вводные лекции по численным методам. М.: Логос. 2004. 184 с.
4. Надеев А.И., Машенко А.И., Черкасова Г.С., Меснянкина П.А. Методы построения математических моделей магнитострикционных преобразователей // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. 2006. 1 (30). С. 99–105.
5. Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы. М.: Наука. 1989. 432 с.
6. Шмелев А.А. Интеллектуальный магнитострикционный датчик линейных перемещений / А.А. Шмелев, В.Х. Ясовеев // Датчики и системы. 2014. № 12. С. 12-15.
7. Шмелев А.А. Математическая модель генератора сигнала магнитострикционного преобразователя линейных перемещений при воздействии на него электромагнитной помехи / А.А. Шмелев, В.Х. Ясовеев // Промышленные АСУ и контроллеры. 2016. № 11. С. 21-25.
8. Ясовеев В.Х., Исаков Р.Р. Принципы построения магнитострикционных датчиков перемещения // Датчики и системы. 2001. № 3. С. 53-60.

9. Ясовеев В.Х., Шмелев А.А. Интеллектуализация магнитострикционных датчиков перемещения. Вторая международная конференция «Интеллектуальные технологии обработки информации и управления». Уфа. 2014. Том 1. С. 151-154.

Сведения об авторах

Ясовеев Васих Хаматович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Информационно-измерительной техники ФГБОУ ВО «УГАТУ». E-mail: yasov@mail.ru.

Шмелев Александр Александрович, аспирант кафедры Информационно-измерительной техники ФГБОУ ВО «УГАТУ», инженер-электроник АО НПФ «Геофизика». E-mail: sasha_sh_88@mail.ru.

Мухаметова Гульнара Зуфаровна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры математики ФГБОУ ВО «УГАТУ». E-mail: mgz@mail.ru.

Секция 3
«МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ»

УДК 532.5

Башмаков Р.А., Шагапов В.Ш., Фокеева Н.О.

**ЗАВИСИМОСТЬ МЕЖДУ ДАВЛЕНИЕМ И РАСХОДОМ ПРИ
ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ СКВАЖИНЫ С ГРП**

В статье рассматривается математическая модель фильтрации флюида в трещине ГРП и окружающем пласте, изучаются изменения давления и расхода при переходных режимах работы скважины.

Ключевые слова: расход, низкопроницаемый коллектор, вертикальная скважина, гидроразрыв пласта, изменение давления.

Bashmakov R.A., Shagapov V.Sh., Fokeeva N.O.

**THE RELATIONSHIP BETWEEN PRESSURE AND FLOW RATE
DURING TRANSIENT MODES OPERATIONS OF A WELL WITH
HYDRAULIC FRACTURING**

The article discusses a mathematical model of fluid filtration in the hydraulic fracture and surrounding reservoir, studying pressure and rate changes during well operation modes transforms.

Key words: rate, low-permeability reservoir, vertical well, hydraulic fracturing, pressure change.

Гидроразрыв пласта (ГРП) занимает особое место среди методов интенсификации работы добывающих скважин и увеличения приемистости нагнетательных. Так, например, одна из крупнейших российских компаний в прошлом году установила свой личный рекорд: за месяц на месторождениях предприятия было выполнено 600 операций ГРП, что доказывает актуальность и эффективность данного метода в условиях современного состояния запасов.

Суть метода заключается в нагнетании в призабойную зону жидкости под высоким давлением, в результате чего происходит разрыв горной породы и образование новых трещин или расширение существующих [4]. Задачи о распределении давления в скважине, в вертикальной трещине при поддержании постоянного расхода, а также в

окрестности трещины ГРП были рассмотрены ранее [1-3]. В основе данной работы математическая модель течения жидкости сначала по трещине и затем в низкопроницаемый пласт, что описывается системой двух дифференциальных уравнений [5].

Рассмотрим вертикальную закреплённую пропантом трещину, полученную путем гидроразрыва пласта (рис. 1).

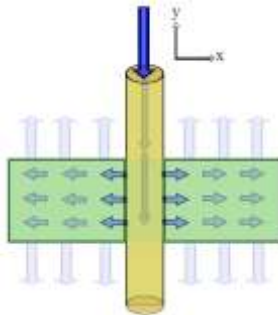


Рис. 1. Схема течения жидкости по трещине и из трещины в пласт

Пласт однородный, ширина трещины значительно меньше ее высоты $d_f \ll h_f$. Скелет пористой среды пласта и трещины несжимаемый, длина трещины бесконечная. Жидкость в пласте распространяется перпендикулярно ее направлению и далее по трещине течет к скважине. В силу симметрии рассматривается одно крыло трещины. Движение флюида в трещине квазиодномерное вдоль оси OX , так как от изменения глубины давление в пласте и трещине не меняется. Начало координат на стенке забойного участка. Ось OY перпендикулярна трещине. Отсчет идет от границы пласта – трещина. Система, описывающая распределение давления в трещине и пласте:

$$\frac{\partial P_f}{\partial t} = \alpha_f \frac{\partial^2 P_f}{\partial x^2} + 2 \frac{m_p}{m_f} \frac{\alpha_p}{d_f} \left(\frac{\partial P_p}{\partial y} \right) \Big|_{y=0}, \quad (0 < x < \infty) \quad (1)$$

$$\frac{\partial P_p}{\partial t} = \alpha_p \frac{\partial^2 P_p}{\partial y^2}, \quad (0 < x < \infty, 0 < y < \infty) \quad (2)$$

где $\alpha_i = \frac{\rho_0 C^2 k_i}{\mu m_i}$ – коэффициенты пьезопроводности,

$P_f = P_f(t, x)$, $P_p = P_p(t, x, y)$. Индексы $i = f, p$ соответствуют зна-

чениям параметров в трещине и пласте, окружающем трещину. Система (1) – (2) рассматривалась в работах [1], [2], [5] при различных краевых условиях.

Полученные в работе формулы позволяют описать связь между расходом жидкости на скважине и эволюцией давления в трещине и скважине. На рисунке 2 приведено П – образное изменение давления на скважине и изменение количества жидкости, закачиваемой в трещину, приходящейся на единицу ее высоты в зависимости от времени t .

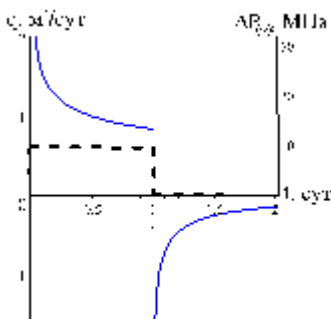


Рис. 2. П – образное изменение давления на скважине (пунктирная линия) и соответствующее изменение расхода закачиваемой жидкости (сплошная линия)

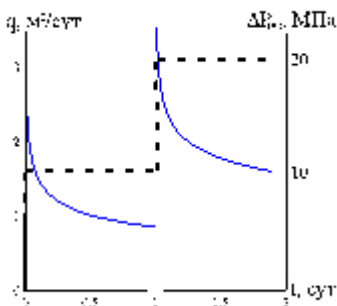


Рис. 3. Двухступенчатое изменение давления (пунктирная линия), расход жидкости на единицу высоты трещины (сплошная линия)

На рисунке 3 показана эволюция давления в трещине и значения расхода при двухступенчатом изменении давления в скважине на ве-

личину $\Delta P_{(w)0} = 10$ МПа в момент времени $\tau_0 = 0$ и резком увеличении до $\Delta P_{(w)1} = 20$ МПа в момент времени $\tau_1 = 1$ сутки.

Рисунок 4 демонстрирует как П-образное изменение давления на скважине влияет на давление в трещине при различном расстоянии от скважины: в момент времени $\tau_0 = 0$ давление на скважине изменяется на величину $\Delta P_{(w)} = 10$ МПа, и держится постоянным до момента времени $\tau_1 = 1$ сут. В момент времени $t = \tau_1$ давление в скважине резко возвращается к первоначальному значению. Линии 1, 2, 3, 4 соответствуют моментам времени $t = 1$ сутки, 1 сутки и 10 минут, 1 сутки и 30 минут, 1 сутки и 12 часов.

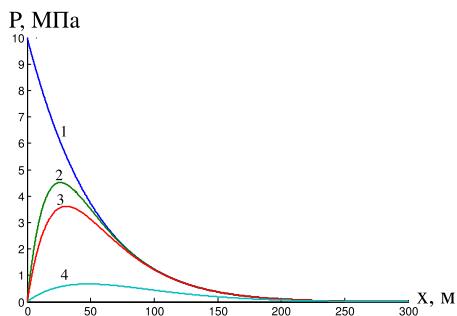


Рис. 4. Распределение давления в трещине при П – образном изменении давления на скважине: 1 – сутки, 2 – сутки и 10 минут, 3 – сутки и 30 минут, 4 – сутки и 12 часов

В настоящей работе изучены переменные режимы работы скважины, получены формулы для определения изменения давления и расхода в трещине ГРП в зависимости от времени и расстояния до скважины. Основываясь на результатах, могут быть определены параметры трещины ГРП и пласта, что применимо при интерпретации данных гидродинамических исследований скважин.

Библиографический список

1. Нагаева З. М., Шагапов В. Ш. Об упругом режиме фильтрации в трещине, расположенной в нефтяном или газовом пласте // Прикладная математика и механика. – 2017. – Т. 81. № 3. – С. 319–329.

2. Хабибуллин И. Л., Хисамов А. А. Моделирование нестационарной фильтрации вокруг скважины с вертикальной трещиной гидроразрыва // Вестник Башкирского университета. – 2017. – Т. 22. – № 2. – С. 309 – 314.

3. Шагапов В. Ш., Нагаева З. М. К теории фильтрационных волн давления в трещине, находящейся в пористой проницаемой среде // Прикладная механика и техническая физика. – 2017. – Т. 58. – № 5 (345). – С. 121–130.

4. Экономидес М., Олини Р., Валько П. Унифицированный дизайн гидроразрыва пласта: от теории к практике // Москва-Ижевск: Институт компьютерных технологий, 2007. – 237 с.

5. Cinco-Ley H. Evaluation of Hydraulic Fracturing by Transient Pressure Analysis Methods // SPE 10043 Petrol. Exh. and Techn. Symp., Beijing China, Mar 18-26, 1982.

Сведения об авторах

Башмаков Рустэм Абдрауфович, кандидат физико-математических наук, доцент. E-mail: bashmakov_rustem@mail.ru.

Шагапов Владислав Шайхулагзамович, доктор физико-математических наук, профессор.

Фокеева Нина Олеговна, аспирант ИМех УФИЦ РАН. E-mail: ffoxnina@gmail.com.

УДК 658.53: 681.317.7

Вишневский А.А., Ясоев В.Х.

ПРОЧНОСТНОЙ АНАЛИЗ МЕМБРАНЫ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА ДАВЛЕНИЯ

В статье рассматривается прочностной анализ мембраны волоконно-оптического датчика давления.

Ключевые слова: предел прочности, предел текучести, упругий материал, эквивалентные напряжения, собственная частота мембраны.

Vishnevskiy A.A., Yasoveev V.Kh.

FIBER OPTICAL PRESSURE SENSOR MEMBRANE STRENGTH ANALYSIS

The article discusses the fiber optical pressure sensor membrane strength analysis.

Keywords: tensile strength, yield strength, elastic material, equivalent stresses, membrane natural frequency.

Волоконно-оптические датчики давления (ВОДД) относятся к контрольно-измерительным приборам для применения в нефтяной, газовой добывающей и химической промышленности, а более конкретно к аппаратуре для повышения точности измерения параметров давления и температуры.

Волоконно-оптические датчики давления отражательного типа образуют самую большую группу амплитудных ВОДД из-за простоты технологий изготовления и конструкционного исполнения. Зеркальные отражательные поверхности получили наибольшее распространение по причине того, что они вносят наименьшие потери светового потока [1].

В то же время имеет место большая погрешность в ВОДД отражательного типа. Она возникает в условиях воздействий внешних механических факторов при неинформативных изгибах оптического волокна. Кроме того, наличие низкой чувствительности преобразования является существенным недостатком известных ВОДД отражательного типа. Это обусловлено значительными потерями в пределах апертурного угла оптического волокна при расхождении потока света [2].

Согласно условиям работы мембраны выбран упругий сплав аустенитного класса, которые содержат значительную долю хрома и никеля. Таким образом, в качестве материала мембраны выбран 36НХТЮ. Данный сплав относится к прецизионным с заданными свойствами упругости. Он обладает в широком температурном диапазоне стабильностью характеристик, имеет высокую пластичность, жаростойкость, коррозионной стойкостью. Упругие чувствительные элементы из данного сплава способны адекватно работать в агрессивных средах и при температурах до 250 °С.

Корпус датчика выполнен из хромоникелетитановой аустенитной стали марки 12Х18Н10Т. Данная марка стали отличается высокой пластичностью, жаростойкостью и высокой коррозионной стойкостью в ряде жидких сред. Датчик покрыт композитным материалом

толщиной 100 мкм. На мембране размещено циркониевое зеркальное покрытие площадью 1 мм². Диаметр световодов принят 125 мкм, включая оболочку.

Поэтому, в ходе моделирования в системе Solid Works Simulation задача установления зависимости эквивалентных напряжений и перемещения от внешнего давления на мембрану является основополагающей, которая может быть решена методом выборки различных комбинаций слоев мембраны и их числа [3].

1.1 Прочностной расчет упругого материала мембраны (36НХТЮ)

В таблице 1 приведены характеристики материала мембраны датчика. На рисунках 1 и 2 приведены результаты расчета перемещения мембраны и распределение эквивалентных напряжений.

Таблица 1 – Прочностные характеристики материала (36НХТЮ)

Модуль упругости E , МПа	Коэффициент Пуассона μ	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа
195000	0,24	885

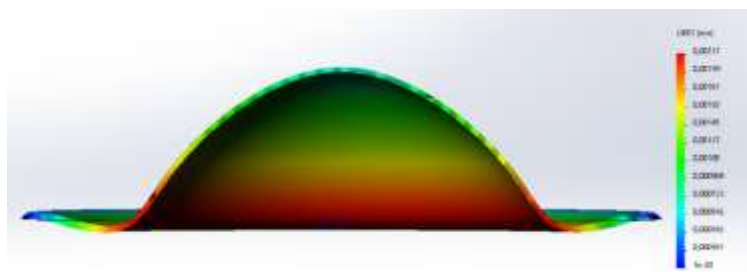


Рис. 1. Перемещение мембраны

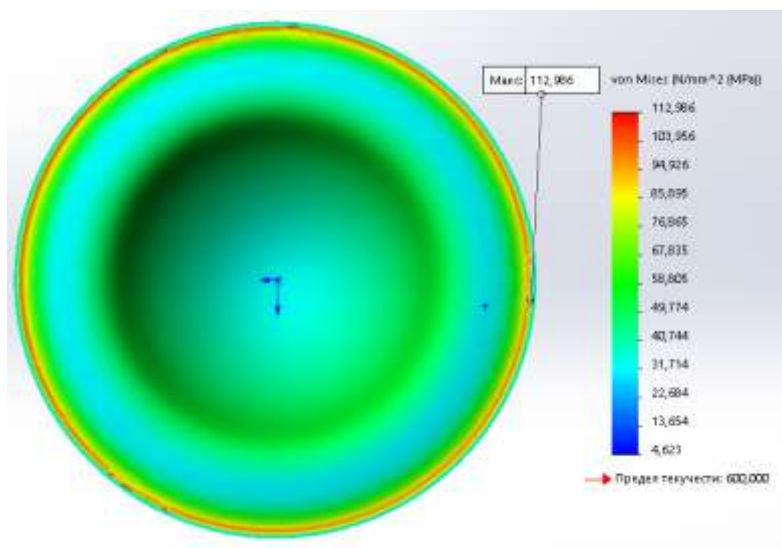


Рис. 2. Распределение эквивалентных напряжений

Максимальные эквивалентные напряжения размещаются в зоне заделки мембраны.

По результатам расчета получены данные, представленные в таблице 2. Зависимости расчета перемещения мембраны и распределение эквивалентных напряжений приведены на рисунке 3.

Таблица 2 – Результаты прочностного расчета мембраны из материала (36НХТЮ)

Давление, МПа	1	2	3	4	5
Напряжение, МПа	112,986	225,972	338,958	451,944	564,93
Перемещение, мм	0,00217	0,00434	0,00651	0,00868	0,0108

Давление, МПа	6	7	8	9	10
Напряжение, МПа	677,91	790,90	903,88	1016,87	1129,86
Перемещение, мм	0,013	0,0152	0,0174	0,0195	0,0217

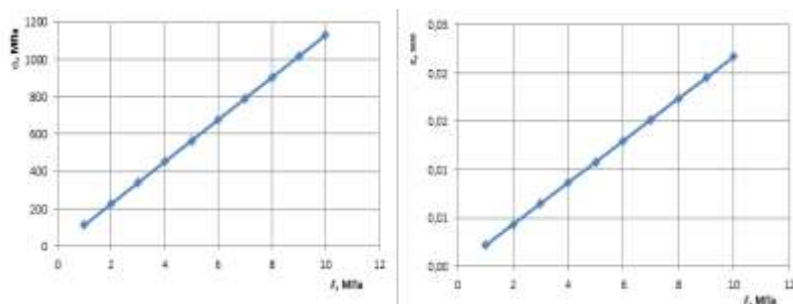


Рис. 3. Зависимость эквивалентных напряжений и перемещения от внешнего давления на мембрану

Исходя из прочностных характеристик материала, максимальное допускаемое напряжение составляет 885 МПа, что соответствует давлению $F = 7,8$ МПа на мембрану.

1.2. Прочностной расчет мембраны, состоящей из углепластика (защитного слоя), 30НХТЮ (упругого материала), отражающего слоя ($ZrO_2-Y_2O_3$)

По результатам расчета получены данные, представленные в таблице 3. Зависимости расчета перемещения мембраны и распределение эквивалентных напряжений приведены на рисунке 4.

Предел прочности $ZrO_2-Y_2O_3$ $\sigma_B = 800$ МПа.

При использовании данных материалов минимальный коэффициент запаса прочности составляет $k=1,53$.

Таблица 3 – Результаты прочностного расчета 3-слойной мембраны

Давление, МПа	1	2	3	4	5
Напряжение Углепластик, МПа	27,589	55,179	82,768	110,357	137,738
Напряжение 30НХТЮ, МПа	50,456	100,912	151,376	201,825	252,266
Напряжение $ZrO_2-Y_2O_3$, МПа	52,456	104,91	157,37	209,824	262,259
Перемещение, мм	0,00149	0,0029	0,0044	0,00599	0,00749

Давление, МПа	6	7	8	9	10
Напряжение Углепластик, МПа	165,536	193,126	220,714	248,305	275,876
Напряжение 30НХТЮ, МПа	307,752	353,21	403,65	472,11	504,533
Напряжение $ZrO_2-Y_2O_3$, МПа	314,753	367,216	419,648	454,11	524,517
Перемещение, мм	0,00898	0,01042	0,01193	0,01343	0,01492

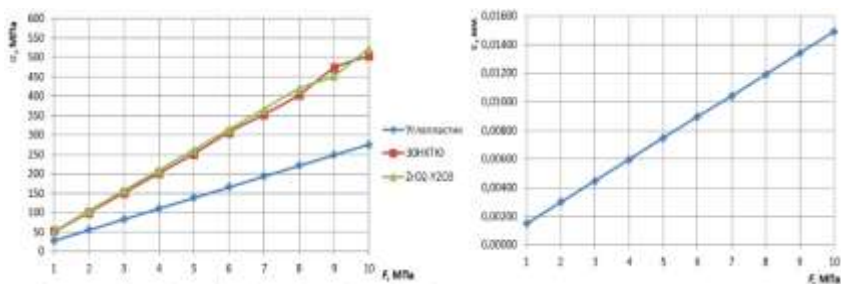


Рис. 4. Зависимость эквивалентных напряжений и перемещения от внешнего давления на мембрану

1.3. Прочностной расчет мембраны, состоящей из углепластика (защитного слоя), 30НХТЮ (упругого материала), 7 слоев ($ZrO_2-Y_2O_3$)

По результатам расчета получены данные, представленные в таблице 4. Зависимость расчета перемещения мембраны приведен на рисунке 5.

Таблица 4 – Результаты прочностного расчета 7-слойной мембраны

Давление, МПа	1	2	3	4	5
Перемещение δ , мм	0,00132	0,00265	0,00398	0,00553	0,00663

Давление, МПа	6	7	8	9	10
Перемещение δ , мм	0,00796	0,00929	0,01066	0,01198	0,01334

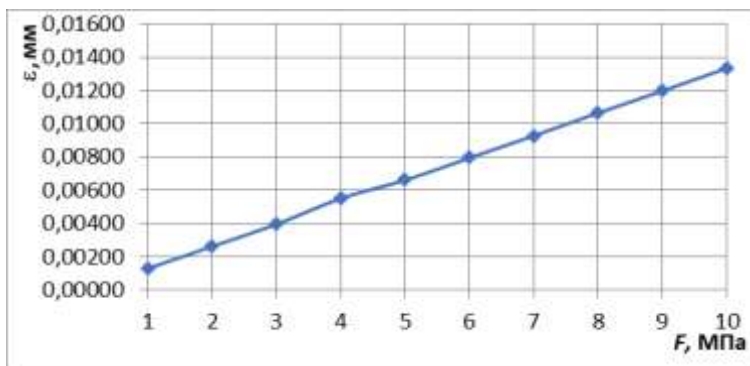


Рис. 5. Зависимость перемещения мембраны от внешнего давления

2.1. Характеристика отражающей способности материалов мембраны

В таблице 5 представлены показатели преломления ZrO_2 и $ZrO_2-Y_2O_3$.

Таблица 5 – Показатели преломления ZrO_2 и $ZrO_2-Y_2O_3$

Материал	Показатель преломления, n
ZrO_2	1,85
$ZrO_2-Y_2O_3$	1,98

На основании представленных в таблице 5 данных получены коэффициенты отражения материалов мембраны. Результаты представлены на рисунке 6.

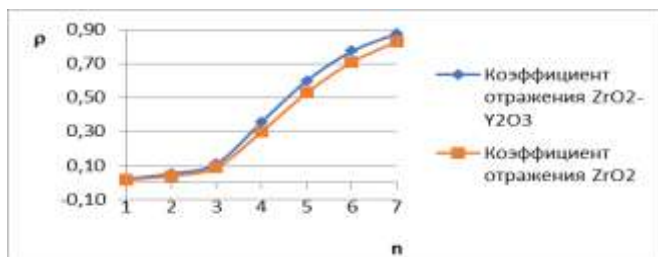


Рис. 6. Зависимость коэффициента отражения от количества отражающих слоев на мембране

Отражающая способность Zr при длине волны $\lambda = 550$ нм, составляет 57 %.

2.2. Расчет усталостной прочности мембраны

На рисунке 7 представлено распределение жизненного цикла по мембране системы: углепластик-30НХТЮ- ZrO_2 - Y_2O_3 (1 слой), область с наименьшей усталостной прочностью размещается в зоне заделки, что является определяющим [4]. Расчет ведется при максимальном давлении на мембрану 10 МПа.

В таблице 6 представлены результаты анализа усталостной прочности для мембраны системы: углепластик-30НХТЮ- ZrO_2 - Y_2O_3 и углепластик-30НХТЮ- ZrO_2 с количеством слоев отражающего покрытия $n = 1-7$.

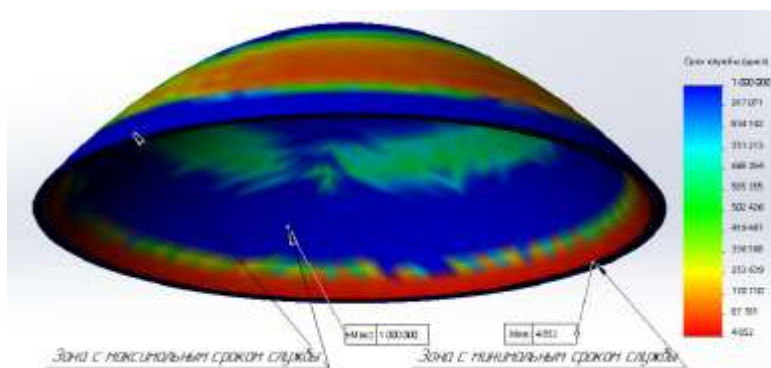


Рис. 7. Распределение жизненного цикла

Таблица 6 – Результаты анализа усталостной прочности для мембраны системы: углепластик-30НХТЮ- ZrO_2 - Y_2O_3 и углепластик-30НХТЮ- ZrO_2

	Слой 1	Слой 2	Слой 3	Слой 4	Слой 5	Слой 6	Слой 7
ZrO_2 - Y_2O_3 , цикл	4852	5142	5753	6357	6912	7756	8162
ZrO_2 , цикл	4835	5129	5768	6335	6891	7741	8097

Графически анализ усталостной прочности представлен на рисунке 8.

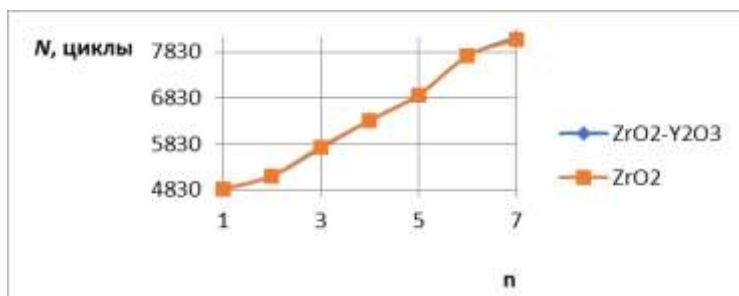


Рис. 8. Зависимость жизненных циклов от количества отражающих слоев

Из результатов расчета сделан следующий вывод: количество циклов до разрушения мембраны с отражающим покрытием $ZrO_2-Y_2O_3$ незначительно больше. Анализ усталостной прочности мембраны с отражающим покрытием Zr не производился в связи с разрушением при расчете статического прочностного анализа.

2.3. Расчет собственной частоты мембраны

Для определения запаса по критической частоте, проведен анализ собственной частоты мембраны системы: углепластик-30НХТЮ- $ZrO_2-Y_2O_3$ и углепластик-30НХТЮ- ZrO_2 с количеством слоев отражающего покрытия $n = 1-7$, результаты расчета представлены в таблице 7.

Таблица 7 – Анализ собственной частоты мембраны системы: углепластик-30НХТЮ- $ZrO_2-Y_2O_3$ и углепластик-30НХТЮ- ZrO_2

	Слой 1	Слой 2	Слой 3	Слой 4	Слой 5	Слой 6	Слой 7
$ZrO_2-Y_2O_3$, Гц	20995	22431	23695	24949	25557	25971	26357
ZrO_2 , Гц	19287	20606	21776	22919	23478	23858	24269

Графически анализ собственной частоты мембраны представлен на рисунке 9.

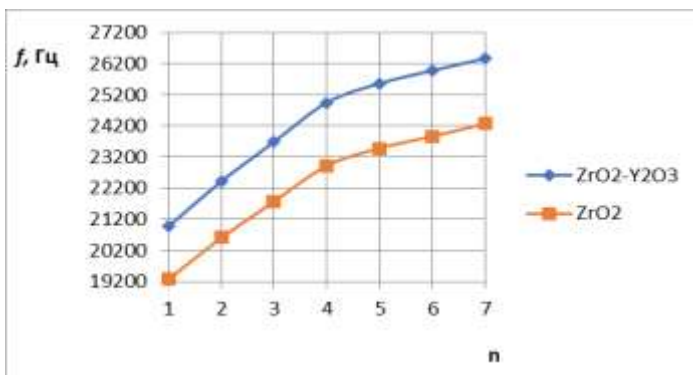


Рис. 9. Зависимость собственной частоты мембраны от количества отражающих слоев

Используя данные из рисунка 5, был произведен термический расчет мембраны с отражающим покрытием $ZrO_2-Y_2O_3$ с целью определения относительной погрешности в зависимости от температуры рабочей среды [5]. Расчет произведен при максимальном давлении $F = 10$ МПа.

На рисунке 10 приведена зависимость относительной погрешности и перемещения от температуры рабочей среды.

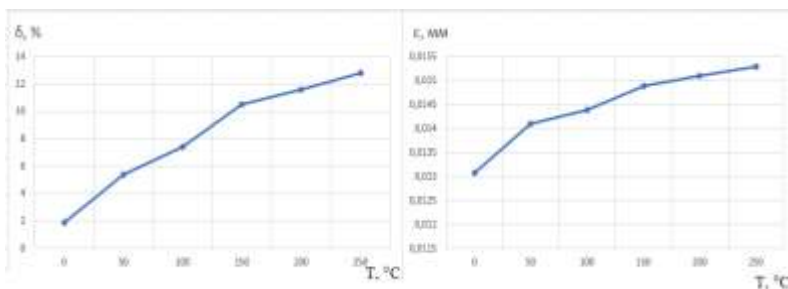


Рис. 10. Зависимость относительной погрешности и перемещения от температуры рабочей среды

Диапазон температур для разработанного ВОДД был выбран по техническим условиям в пределах от 0 до 25 °C, относительная погрешность при этом составляет 1.9-3%. При достижении температуры

рабочей среды $T = 250\text{ }^{\circ}\text{C}$ относительная погрешность перемещения датчика составляет $\delta = 12,8\%$. Если потребуется чтобы датчик работал в условиях до $250\text{ }^{\circ}\text{C}$, то возможно компенсировать такую погрешность, путем введения поправочных калибровочных коэффициентов [6].

На основании проведенного прочностного анализа многослойной мембраны, были сделаны следующие выводы:

- при увеличении количества слоев отражающего напыления, перемещение мембраны изменяется незначительно в пределах 12%;

- коэффициент отражения $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$ при количестве слоев $n = 7$, составляет, $\rho_{\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3} = 0,88 \pm 0,06$;

- количество циклов до разрушения у мембраны с покрытием $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$ больше в среднем на 24 цикла;

- в качестве напыления предпочтительнее использование $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$ с количеством отражающих слоев $n = 7$, в связи с наибольшими перемещениями мембраны $0,0133 \pm 0,0006$ мм и лучшими показателями отражения $\rho_{\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3} = 0,88 \pm 0,06$;

- применение сплавов $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$ возможно при давлении на мембрану не более 7,5 МПа и количеством слоев $n = 7$.

Библиографический список

1. Вишневский А.А., Ясовеев В.Х. Алгоритм линеаризации выходной характеристики волоконно-оптического датчика / IV Междунар. науч.-практ. конф. «Актуальные проблемы науки и образования в современном вузе»: Сб. науч. тр. – Sterlitaamak: Bashkirskiy gosudarstvennyy universitet, 2019.

2. Вишневский А.А., Ясовеев В.Х. Применение селективного усилителя для коррекции погрешностей волоконно-оптических датчиков давления расходомеров массы газожидкостных смесей / II Междунар. науч.-практ. конф. «САПР и моделирование в современной электронике»: Сб. науч. тр. – Bryansk: Bryanskii gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet, 2018.

3. Вишневский А.А., Ясовеев В.Х., Хасанов З.М. Коррекция погрешностей волоконно-оптических датчиков давления для АСУ ТП нефтегазодобычи / Междунар. науч.-техн. конф. «Шляндинские чтения – 2018»: Сб. науч. тр. – Penza: Penzenskiy gosudarstvennyy universitet, 2018.

4. Гридчин В.А., Бялик А.Д. Математическое моделирование мембранных чувствительных элементов амплитудных волоконно-оптических датчиков давления // Автометрия. Российская академия наук. Сибирское отделение. 2005. Т. 41, № 3.

5. Vishnevskiy A.A., Yasoveev V. Kh., Khasanov Z.M., Khasanov O.Z. "Estimation of dynamic errors in laser optoelectronic dimension gauges for geometric measurement of details", VIII International Scientific and Practical Conference "Information and Measuring Equipment and Technologies" (IME&T 2017), Tomsk, Russia, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201815501042>.

6. Vishnevskiy A.A., Khasanov Z.M., Khasanov O.Z. "Modeling of heat transfer processes of the thermally stressed state of conjugated deformable bodies in fuel-control equipment", XXVII International conference «Mathematical and computer simulation in mechanics of solids and structures – MCM 2017», St. Petersburg, Russia, 2018. ISSN 2588-0233.

Сведения об авторах

Вишневский Александр Анатольевич, аспирант УГАТУ (Уфа).
E-mail: host_of_peace@list.ru.

Ясовев Васих Хаматович, доктор технических наук, профессор УГАТУ (Уфа). E-mail: yasov@mail.ru.

УДК 51-7

Жильников А.А., Жильников Т.А., Жулев В.И.

ПРЯМОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ТОМОГРАФИИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ОТРАЖЕНИЙ

В ходе томографического наблюдения сложной радиолокационной сцены, решающего задачи реконструкции многомерности, разработана, базирующаяся на принципах прямого и обратного преобразования томографии, стохастическая модель, описывающая предметную область сложной радиолокационной сцены.

Ключевые слова: сложная радиолокационная сцена, радиолокационное наблюдение, томографические подходы в радиолокации, преобразование Радона.

Zhilnikov A.A., Zhilnikov T.A., Zhulev V.I.

DIRECT CONVERSION TOMOGRAPHY OF RADAR REFLECTIONS

In the course of tomographic observation of a complex radar scene that solves the problems of multidimensional reconstruction, a stochastic model based on the principles of direct and inverse tomography describing the subject area of a complex radar scene was developed.

Keywords: complex radar scene, radar observation, tomographic approaches in radar, Radon transformation.

Обращаясь к возможности повышения информативности радиолокационного наблюдения, реализуемого для моностатического варианта, обоснованной является потребность использования достижений современных технологий при обнаружении скрытых и рассеивающих объектов недоступных для регистрации классическими методами [1, 2].

Предлагаемая в работе [3] модификация радиолокационного наблюдения, помимо регистрации одиножды отраженного зондирующего сигнала, в соответствии с классическими принципами локации, осуществляет повышение информативности за счет учета возникающих внутри сцены многократных отражений, ранее относимых к помехам. Последнее, во-первых, делает возможной локализацию объектов сцены, которые минимизируют или даже исключают отражение в направлении азимутального угла зондирующего сигнала передатчика, и рассеивают, так, что благодаря эффекту многократных отражений от других объектов, сигнал «возвращается» в приемник, пусть даже под другим азимутальным углом. Во-вторых, становится возможной локализация скрытых от прямого зондирования объектов другими, например, более крупными габаритными объектами.

В настоящее время научное направление, позиционируемое как компьютерная томография, активно развивается, совершенствуется, в том числе, вследствие использования математического аппарата многомерного преобразования Радона, и давно вышло за рамки устоявшегося описания [4, 5].

В связи с этим, очевидным является стремление использования открывающихся возможностей томографических подходов в радиолокации. Однако такое использование невозможно без разрешения некоторых проблем. Основной проблемой применения является спо-

соб формирования исходных проекционных данных, описываемых прямым интегральным преобразованием Радона. Поскольку в компьютерной томографии исходные проекционные данные образованы лучевыми суммами (или луч-суммами), то за прямым преобразованием Радона, описываемым интегралом, закрепилась устойчивая ассоциация с интегрированием по прямой линии (или лучу). Связано это с тем, что решение указанного основного интегрального уравнения, именуемое обратным преобразованием Радона, найдено именно для подобного представления. Впрочем, направление интегрирования в таком уравнении может быть отлично от прямой линии и осуществляться, например, по известной более сложной ломаной траектории. Приверженность к интегрированию по прямой линии объясняется тем, что существующий четко определенный порядок формирования исходных проекционных данных снимет все вопросы о соблюдении их линейной независимости и достаточном количестве для реконструкции (восстановления). При иных способах формирования, для того, чтобы конечные расчетные матрицы не были вырожденными, линейную независимость проекционных данных необходимо доказывать. Другими словами, с позиций проведения эксперимента, томографическая реконструкция является активным экспериментом, поскольку техническими приемами и средствами достигается выполнение требований математического аппарата. В противоположность указанной, реконструкция, базирующаяся на основе использования эффекта многократных отражений, является пассивным экспериментом, в котором приходится оперировать не тем, что требуется, а тем, что удалось получить. В складывающейся ситуации малоракурсности, при детерминированном описании радиолокационной сцены однозначного единственного решения может не быть, поэтому в стремлении получить хоть какое-нибудь приемлемое решение обращаются к вероятностному описанию.

Таким образом, в ходе томографического наблюдения сложной радиолокационной сцены, решающего задачи реконструкции многомерности, в работе разработана, базирующейся на принципах прямого и обратного преобразования томографии, вероятностная модель, описывающая формирование исходных проекционных данных томографии отражений.

Библиографический список

1. Бакут П.А., Большаков И.А., Тартаковский Г.П. и др. Вопросы статистической теории радиолокации. Т. 1. М: Сов. Радио. 1963. 421 с.
2. Богомолов А.Ф. Основы радиолокации // М.: Советское радио, 1954. 303 с.
3. Жильников А.А., Жильников Т.А., Жулев В.И. Модель информационного канала для случая многократных отражений при реконструкции сложных радиолокационных сцен // Авиакосмическое приборостроение. 2020. № 2. С. 3-12. DOI: 10.25791/aviakosmos.02.2020.1140.
4. Жильников А.А., Жильников Т.А., Жулев В.И. Развитие объемной томографии для определения векторных физических величин // Инженерная физика. 2019. № 9. С. 10-15. DOI: 10.25791/infizik.09.2019.834.
5. Жильников А.А., Жильников Т.А., Жулев В.И. Фinitная томографическая реконструкция // Биомедицинская радиоэлектроника. 2019. Т. 22. № 4. С. 31-37. DOI: 10.18127/j15604136-201904-05.

Сведения об авторах

Жильников Артем Александрович, кандидат технических наук, преподаватель кафедры тылового обеспечения уголовно-исполнительной системы Академии ФСИН России (Рязань). E-mail: ark9876@mail.ru.

Жильников Тимур Александрович, кандидат технических наук, доцент, начальник кафедры математики и информационных технологий управления Академии ФСИН России (Рязань). E-mail: quadrus02@mail.ru.

Жулев Владимир Иванович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информационно-измерительной и биомедицинской техники Рязанского государственного радиотехнического университета им. В.Ф. Уткина (Рязань). E-mail: zhulev.v.i@rsreu.ru.

Зеленова М.А., Рахматуллин А.Р.

**ВОЗНИКНОВЕНИЕ БАГОВ В ХОДЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО
ЭКСПЕРИМЕНТА ПРИ МАТЕМАТИЧЕСКОМ
МОДЕЛИРОВАНИИ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

В работе показано, что в ходе проведения численного эксперимента с применением математических пакетов следует учитывать вероятность обнаружения «новых» эффектов, которые на самом деле будут являться следствием вычислительной ошибки. В частности, это связано с наличием особых точек, которые оказывают влияние на результат программных расчётов.

Ключевые слова: вычислительный эксперимент, математические пакеты, MathCad.

Zelenova M.A., Rakhmatullin A.R.

**APPEARANCE OF BUGS DURING A COMPUTATIONAL
EXPERIMENT DURING MATHEMATICAL SIMULATION OF
PHYSICAL PROCESSES**

It is shown in the work that in the course of a numerical experiment using mathematical packages, one should take into account the probability of detecting "new" effects, which in fact will be a consequence of a computational error. In particular, this is due to the presence of singular points that affect the result of software calculations.

Key words: computational experiment, mathematical packages, MathCad.

В ходе выполнения вычислительного эксперимента по исследованию полей давления при термогазодинамическом воздействии на призабойную зону нефтегазового пласта был обнаружен интересный факт работы программного пакета MathCad. Известно, что в случае, когда интегрирование и дифференцирование функций производится по независимым аргументам, допускается менять местами порядок совершения операций интегрирования и дифференцирования. Однако существуют особые точки, в которых либо не существует интеграл и производная, либо наблюдается так называемая сингулярность. В этих точках порядок проведения операций интегрирования и диффе-

ренцирования по независимым переменным будет влиять на результат.

В процессе построения математической модели задачи о полях давления при импульсном воздействии на призабойную зону, было получено следующее выражение для функция давления продуктивного слоя

$$P = -\frac{2U}{\pi} \int_0^{\infty} \exp(-u^2 t) F(r, u) du, \quad (1)$$

$$\text{где } F(r, u) = \frac{J_0(ru)[uY_0(u) - \alpha Y_1(u)] - Y_0(ru)[uJ_0(u) - \alpha J_1(u)]}{[uJ_0(u) - \alpha J_1(u)]^2 + [uY_0(u) - \alpha Y_1(u)]}.$$

Постановка и решение аналогичной задачи для случая постоянного отбора представлены в работах [1 – 3].

Из формулы для давления видно, что производная по времени t и интеграл по переменной u взаимно независимы. Однако график функции dP/dt будет несколько отличаться и зависеть от порядка проведения операций интегрирования и дифференцирования. Это связано с наличием особой точки $r = 1$. Производная выражения (1) может быть рассчитана по формуле

$$\frac{dP}{dt} = -\frac{2U}{\pi} \frac{d}{dt} \int_0^{\infty} \exp(-u^2 t) F(r, u) du, \quad (2)$$

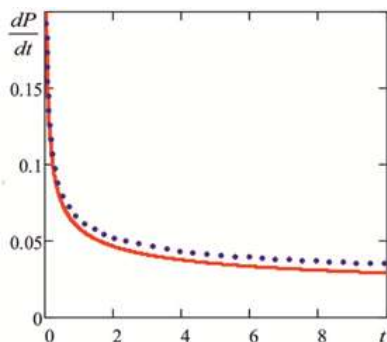


Рис.1. Сопоставление графика производной функции давления в точке с безразмерной координатой $r = 1$. Сплошная кривая построена по формуле (3), пунктирная – по формуле (2)

Однако процедуру дифференцирования можно внести под знак интеграла

$$\frac{dP}{dt} = -\frac{2U}{\pi} \int_0^\infty \frac{d \exp(-u^2 t)}{dt} F(r, u) du = \frac{2U}{\pi} \int_0^\infty u^2 \exp(-u^2 t) F(r, u) du. \quad (3)$$

Во всех других точках порядок проведения операций не имеет значения и кривые, построенные по формулам (2) и (3), будут совпадать.

Этот важный факт следует учитывать при проведении вычислительного эксперимента, т.к. наличие особых точек может привести к обнаружению «новых» эффектов, которые на самом деле будут являться следствием вычислительной ошибки. В ходе выполнения расчётов были обнаружены и другие функции, которые оказались также чувствительны к последовательности выполнения операций дифференцирования и интегрирования. Рассмотрим некоторые из них

$$y(x) = \int_0^\infty e^{-x^2 u} du, \quad (4)$$

$$z(x) = \int_0^\infty e^{-x^2 u} \sin(u) du. \quad (5)$$

Производные функций (4) и (5) по переменной x могут быть рассчитаны по формулам (6) – (7) для функции (4) и (8) – (9) для функции (5) соответственно

$$\frac{dy(x)}{dx} = \frac{d}{dx} \int_0^\infty e^{-x^2 u} du, \quad (6)$$

$$\frac{dy(x)}{dx} = \int_0^\infty \frac{d(e^{-x^2 u})}{dx} du = -2x \int_0^\infty u e^{-x^2 u} du, \quad (7)$$

$$\frac{dz(x)}{dx} = \frac{d}{dx} \int_0^\infty e^{-x^2 u} \sin(u) du, \quad (8)$$

$$\frac{dz(x)}{dx} = \int_0^\infty \frac{d(e^{-x^2 u})}{dx} \sin(u) du = -2x \int_0^\infty u e^{-x^2 u} \sin(u) du. \quad (9)$$

Графики производных (6) – (7) и (8) – (9) представлены на рисунках 2 и 3 соответственно.

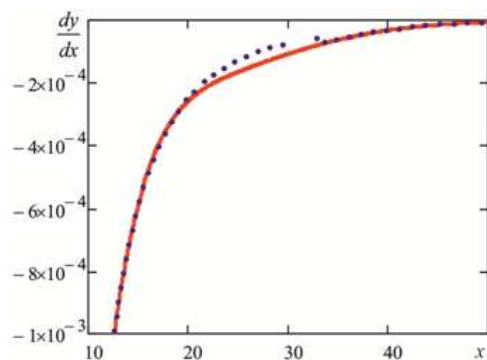


Рис.2. Сопоставление графика производной функции (4), построенная по формуле (6) – пунктирная кривая и по формуле (7) – сплошная

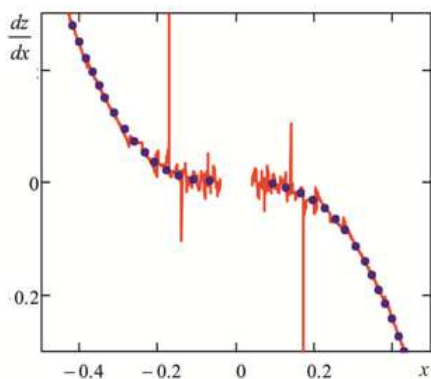


Рис.3. Сопоставление графика производной функции (5), построенная по формуле (8) – пунктирная кривая и по формуле (9) – сплошная

Из рисунков 2, 3 видно, что в случае, когда производная рассчитывается программой MathCad наблюдаются отклонения от реального графика, что может быть воспринято как проявление некоторого эффекта. В действительности же это является ошибкой численного расчёта. Это следует учитывать при построении графиков с применением оператора дифференцирования в пакете MathCad. Однако такая ошибка численного эксперимента наблюдается не всегда.

Библиографический список

1. Филиппов А.И., Ахметова О.В., Ковальский А.А., Зеленова М.А. Поле давления в пласте при заданном дебите скважины // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2020. Т. 6. № 3(23). С. 58-78.
2. Филиппов А.И., Зеленова М.А. Релаксационные процессы в скважине после пуска насоса // Инженерная физика. 2020. № 10. С. 17-22.
3. Филиппов А.И., Зеленова М.А. Численная инверсия квазистационарного температурного поля в тонком анизотропном слое // Математическое моделирование процессов и систем: Материалы X Межд. молодежн. науч.-практ. конф., 27-31 октября 2020 г., г. Стерлитамак / отв. ред. Т.А. Михайлова. – Стерлитамак: Стерлитамакский филиал БашГУ, 2020. С. 274-279.

Сведения об авторах

Зеленова Марина Анатольевна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей и теоретической физики СФ БашГУ. E-mail: marina_ag@inbox.ru.

Рахматуллин Азат Расимович, магистрант СФ БашГУ. E-mail: azat200995@mail.ru.

УДК 62-19

Извеков Ю.А., Гугина Е.М., Шеметова В.В.

НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ВЫБОРА И ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ОСНОВНЫХ ЦЕХОВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

В статье рассматривается подход к научно-обоснованному выбору показателей качества основных цехов металлургического предприятия. Такой подход основан на конструкционном риск-анализе и позволяет оценить их качество по критериям надежной, безаварийной и экономически эффективной эксплуатации.

Ключевые слова: показатели качества, основной цех, металлургическое предприятие, ранжирование, балл.

Izvekov Yu.A., Gugina E.M., Shemetova V.V.

SCIENTIFIC BASIS OF SELECTION AND EVALUATION OF QUALITY INDICATORS OF THE MAIN SHOPS OF A METALLURGICAL ENTERPRISE

The article discusses an approach to the scientifically grounded choice of quality indicators for the main shops of a metallurgical enterprise. This approach is based on structural risk analysis and allows you to assess their quality according to the criteria of reliable, trouble-free and cost-effective operation.

Keywords: quality indicators, main shop, metallurgical enterprise, ranking, score.

Металлургические предприятия представляют собой сложные технические системы, обладающие технологической насыщенностью. Практически во всех основных цехах: кислородно-конвертерный, листопрокатный, доменный и других [4,5,7] находятся потенциально опасные производственные объекты [1,3].

В документах и ГОСТ много внимания уделяется качеству продукции, выпускаемой этими цехами. Вопросам же оценки качества собственно самого производства, на наш взгляд, уделяется времени и внимания недостаточно. Качество цеха и предприятия в целом зависит от безопасной, надежной и экономически эффективной эксплуатации всех тяжело-нагруженных машин, находящихся в них. Таким образом, качество основных цехов по критериям риска [2,4,5] можно научно обосновать в следующем виде.

Цеха ранжируются по основным и неосновным производствам баллах от 0 до 10. 10 – основное производство. В каждом цехе ранжируются опасные производственные объекты в баллах от 0 до 10. 10 – максимальный уровень опасности. При помощи конструкционного риск-анализа [4-6,8] рассчитываются несущие конструкции таких объектов и также ранжируются в баллах от 0 до 10. 10 – соответствует риск аварийной эксплуатации с вероятностью от 0,749 и выше, 5 – уровень предельно-допустимой эксплуатации с вероятностью от 0,521 до 0,749, 0 – уровень нормальной эксплуатации с вероятностью от 0,159 до 0,521 [4,5].

Тогда можно записать:

$$K_n(t) = \sum_{i=1}^n K_{\text{ц}i}(t) = \sum_{j=1}^m K_{\text{оц}j}(t), \quad (1)$$

где $K_n(t)$ - обобщенный показатель качества предприятия в целом, изменяющийся во времени;

где $K_{\text{ц}i}(t)$ - обобщенный показатель качества основного цеха предприятия, изменяющийся во времени;

где $K_{\text{оц}j}(t)$ - обобщенный показатель качества опасного производственного объекта основного цеха металлургического предприятия, изменяющийся во времени.

По этим, постоянно отслеживающимся данным, можно построить тарировочные графики для оценки качества каждого цеха и предприятия в целом.

В условиях несменяемости эксплуатации опасных производственных объектов с истекшим ресурсом такой подход является более чем оправданным.

Библиографический список

1. Федеральный закон «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» от 21.07.97 г. № 116-ФЗ.
2. ГОСТ Р ИСО 9000-2015 Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь (с Поправкой). - М.: Стандартинформ, 2015. - 53 с.
3. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Анализ риска и проблем безопасности. В 4-х частях.// Ч.4. Научно-методическая база анализа риска и безопасности./ Научн. руковод. К.В. Фролов. – М.: МГОФ «Знание», 2007. – 864 с: илл.
4. Извеков Ю.А. Научные основы методологии оценки и повышения качества технических систем металлургического предприятия.// Сборник трудов V Международной научно-технической конференции Живучесть и конструкционное материаловедение (ЖИВКОМ-2020) в дистанционном формате. Москва, 27-29 октября 2020 года./ Москва. ИМАШ РАН им. А.А. Благоданова, 2020. С. 118-119.
5. Izvekov Yu.A. Quantative Evaluation Algorithm Technical System Reliability.// Scientific Works of the VI International Scientific Conference Fundamental Research and innovative Technologies in Mechanical

Engineering. November 26-27, 2019./ Moscow. IMASH RAS A.A. Blagonravova, 2019.P. 195-196.

6. Кузьмин Д. А., Кузьмичевский А. Ю. Метод расчета вероятности хрупкого разрушения оборудования АЭС в различных режимах эксплуатации с постулируемой дефектностью //Надежность и безопасность энергетики. – 2021. – Т. 14. – №. 1. – С. 34-39.

7. Проектирование цехов сталеплавильного производства. Учебник / К.Н. Вдовин, В.Ф. Мысик, В.В. Точилкин, Н.А. Чиченев. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2016. 505 с.

8. Сковрцова Н. К., Филимонова Л. А., Андропова К. А. Риск ориентированный подход для обеспечения промышленной безопасности на предприятиях топливно-энергетического комплекса.// Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Экономика и право. – 2021. – №. 1. – С. 65-74.

Сведения об авторах

Извеков Юрий Анатольевич, кандидат технических наук, доцент МГТУ им. Г.И. Носова (Магнитогорск). E-mail: yurij.izvekov@mail.ru

Гугина Екатерина Михайловна, кандидат педагогических наук МГТУ им. Г.И. Носова (Магнитогорск). E-mail: e.gugina@mail.ru

Шеметова Вероника Владимировна, кандидат физико-математических наук МГТУ им. Г.И. Носова (Магнитогорск). E-mail: shemetova--vv@mail.ru

УДК 532.5.032

Картавцева И.А., Хабибуллин И.Л.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИТОКА ЖИДКОСТИ К СКВАЖИНЕ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ СТВОЛА СКВАЖИНЫ И НАЛИЧИЯ СКИН-ЗОНЫ

В статье рассматривается нестационарный приток жидкости к одиночной скважине в полубесконечном пласте при наличии влияния ствола скважины и скин-зоны.

Ключевые слова: нестационарная фильтрация жидкости, одиночная скважина, полубесконечный пласт, влияние ствола скважины, скин-зона, прямое и обратное преобразования Лапласа.

Kartavtseva I.A., Khabibullin I.L.

MATHEMATICAL MODELING OF FLUID FLOW TO A WELL CONSIDERING WELL-BORE STORAGE AND SKIN EFFECTS

The article discusses unsteady state flow of fluid to a single well in a half-infinite reservoir considering well-bore storage and skin effects.

Keywords: unsteady state flow of fluid, single well, half-infinite reservoir, influence of well-bore storage effect, skin effect, direct and inverse Laplace transformation.

Постановка краевой задачи

Нестационарная фильтрация жидкости к одиночной скважине в горизонтальном полубесконечном пласте при наличии скин-зоны и при учете влияния ствола скважины описывается следующей задачей [1, 6]:

$$\frac{\chi}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial P}{\partial r} \right) = \frac{\partial P}{\partial t}, \quad r_w \leq r < \infty \quad (1)$$

$$P(r, t = 0) = P(\infty, t) = P_0 \quad (2)$$

$$P_w(t) = P(r_w, t) - S r_w \frac{\partial P(r_w, t)}{\partial r} \quad (3)$$

$$Q(t) = 2\pi \frac{kh r_w}{\mu} \frac{\partial P(r_w, t)}{\partial r} + C \frac{\partial P}{\partial t} \quad (4)$$

В задаче (1) – (4) введены обозначения:

$P(r, t)$ – значение давления в пласте в момент времени t на расстоянии r от центра скважины; P_0 – начальное пластовое давление; P_w – давление в скважине на забое; $P(r_w, t)$ – давление в скин-зоне; S – скин-фактор; C – коэффициент влияния ствола скважины; r_w – радиус скважины; k, h – проницаемость и мощность пласта; μ – вязкость жидкости; χ – коэффициент пьезопроводности пласта; $Q(t)$ – дебит скважины на устье.

Задача (1) – (4) включает в себя все известные случаи эксплуатации одиночной скважины в пласте.

При отсутствии скин-эффекта ($S=0$):

а. Уравнения (1) – (2) и условие $P(r_w, t) = P_c$ определяют давление в полубесконечном пласте, когда на забое скважины поддерживается постоянное давление [3].

б. Уравнения (1) – (2) и (4) при $C=0$ определяют давление в полубесконечном пласте, когда на скважине задан дебит. Точное решение этой задачи получено так же в [3].

в. Уравнения (1) – (2) и (4), когда в (4):

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial P(r_w, t)}{\partial t}$$

представляют задачу о нахождении давления в полубесконечном пласте с учетом влияния ствола скважины. Случай $Q(t) = 0$ при этом, соответствует закрытию скважины на устье.

При наличии скин-эффекта ($S \neq 0$) к (1) и (2) добавляется условие (3), а в условии (4):

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial P_w}{\partial t}.$$

Условие (3), которое не имеет строгого вывода, постулируется как гипотеза о стационарном скин-эффекте. Физический смысл этого условия заключается в следующем. Если в пласте вокруг скважины имеется зона пониженной проницаемости, то это приводит к дополнительному росту перепада давления между пластом и скважиной на величину, равную $Sr_w \frac{\partial P(r_w, t)}{\partial r}$ за счет увеличения фильтрационного сопротивления.

Метод расчета

Рассмотрим решение задачи при отсутствии скин-эффекта ($S = 0$).

Обозначим через $\Delta P(r, t) = P_0 - P(r, t)$ понижение давления в пласте, тогда задачу (1) – (4) в пространстве изображений преобразования Лапласа представим в виде:

$$\frac{d^2 \Delta \bar{P}(r, s)}{d r^2} + \frac{1}{r} \frac{d \Delta \bar{P}(r, s)}{d r} = \frac{s}{\chi} \Delta \bar{P}(r, s) \quad (5)$$

$$\Delta \bar{P}(\infty, s) = 0 \quad (6)$$

$$P_w(s) - P_0 = \Delta \bar{P}(r_w, s) - S r_w \frac{d \Delta \bar{P}(r_w, s)}{d r} \quad (7)$$

$$\frac{Q}{s} = 2\pi \frac{kh r_w}{\mu} \frac{d \Delta \bar{P}(r_w, s)}{d r} + C s \Delta \bar{P}(r_w, s) \quad (8)$$

Уравнение (5) – это известное уравнение Бесселя, его общее решение выражается через модифицированные функции Бесселя ненулевого порядка первого $I_0\left(\sqrt{\frac{s}{\chi}} r\right)$ и второго $K_0\left(\sqrt{\frac{s}{\chi}} r\right)$ родов [2]:

$$\Delta \bar{P}(r, s) = C_1 I_0\left(\sqrt{\frac{s}{\chi}} r\right) + C_2 K_0\left(\sqrt{\frac{s}{\chi}} r\right) \quad (9)$$

Согласно условию (6), полагаем $C_1 = 0$, так как $I_0(\infty) = \infty$. Тогда:

$$\Delta \bar{P}(r, s) = C_2 K_0\left(\sqrt{\frac{s}{\chi}} r\right) \quad (10)$$

Подставляя уравнение (10) в условие (8), получаем выражение для постоянной C_2 :

$$C_2 = \frac{Q}{s \left[C s K_0\left(\sqrt{\frac{s}{\chi}} r_w\right) - \sqrt{s} \frac{2\pi k h r_w}{\mu \sqrt{\chi}} K_1\left(\sqrt{\frac{s}{\chi}} r_w\right) \right]}$$

Таким образом, решение задачи в изображениях преобразования Лапласа (10) имеет вид:

$$\Delta \bar{P}(r, s) = \frac{Q K_0\left(\sqrt{\frac{s}{\chi}} r\right)}{s \left[C s K_0\left(\sqrt{\frac{s}{\chi}} r_w\right) - \sqrt{s} a K_1\left(\sqrt{\frac{s}{\chi}} r_w\right) \right]} \quad (11)$$

где $a = \frac{2\pi khr_w}{\mu\sqrt{\chi}}$.

При отсутствии влияния ствола скважины ($C = 0$) из уравнения (11) следует, решение задачи о распределении давления в пласте, когда на скважине задан постоянный дебит. Данная задача в полном виде впервые решена в работе [3] и подробно проанализирована в [3, 5]. В этих же работах и рассматривается задача, когда на скважине задано давление.

При малых временах t , что соответствует большим значениям s , то есть, когда $\sqrt{\frac{s}{\chi}}r \gg 1$ и $\sqrt{\frac{s}{\chi}}r_w \gg 1$ с учетом $C = 0$ и асимптотического представления $K_n(x) \approx e^{-x} \sqrt{\frac{\pi}{2x}}$ из уравнения (11) следует:

$$\Delta\bar{P}(r, s) = \frac{Q}{a} \sqrt{\frac{r_w}{r}} \frac{1}{s^{3/2}} e^{-\sqrt{\frac{s}{\chi}}(r-r_w)}$$

При $r = r_w$ следует выражение для понижения давления на забое скважины:

$$\Delta\bar{P}(r, s) = \frac{Q}{a} \frac{1}{s^{3/2}}$$

Учитывая, что $L^{-1} \left[s^{-\frac{3}{2}} \right] = 2 \sqrt{\frac{t}{\pi}} (L^{-1} - \text{символ обратного преобразования Лапласа})$ имеем:

$$\Delta P(r, t) = \frac{2Q\sqrt{t}}{\sqrt{\pi}a} \quad (12)$$

В работе [5] отмечается, что этой формулой можно пользоваться с погрешностью менее 1% по сравнению с точным решением, полученным в работе [3] для $Fo = \sqrt{\frac{\chi t}{r_w^2}} < 0.01$. В [5] так же приведены приближенные формулы, описывающие распределения давления с достаточной для практических расчетов точностью для всего диапазона значений параметра Фурье Fo .

Рассмотрим асимптотические значения выражения (11) при малых значениях времени, то есть, когда $\sqrt{\frac{s}{\chi}} r \gg 1$ и $\sqrt{\frac{s}{\chi}} r_w \gg 1$. При этом, для рассматриваемых модифицированных функций Бесселя выполняется представление ($x \gg 1$):

$$K_n(x) \approx e^{-x} \sqrt{\frac{\pi}{2x}}$$

С учетом этого приближения, (11) представляется в виде:

$$\Delta \bar{P}(r, s) = Q \sqrt{\frac{r_w}{r}} \frac{e^{-\frac{(r-r_w)}{\sqrt{\chi}} \sqrt{s}}}{Cs(s + \frac{a}{C} \sqrt{s})} \quad (13)$$

Для нахождения оригинала используем формулу из таблицы преобразований Лапласа [4]:

$$L^{-1} \left[\frac{e^{-k\sqrt{s}}}{s\sqrt{s}(\sqrt{s} + b)} \right] = \frac{2}{b} \sqrt{\frac{t}{\pi}} e^{-\frac{k^2}{4t}} - \frac{1+bk}{b^2} \operatorname{erfc} \left(\frac{k}{2\sqrt{t}} \right) + \frac{1}{b^2} e^{bk+b^2t} \operatorname{erfc} \left(\frac{k}{2\sqrt{t}} + b\sqrt{t} \right)$$

Тогда из уравнения (13) следует:

$$\Delta P(r, t) = Q \sqrt{\frac{r_w}{r}} \left[\frac{2}{a} \sqrt{\frac{t}{\pi}} e^{-\frac{(r-r_w)^2}{4\chi t}} - \frac{C}{a^2} \left(1 + \frac{a}{C} \frac{r-r_w}{\sqrt{\chi}} \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{r-r_w}{2\sqrt{\chi t}} \right) + \frac{C}{a^2} e^{\frac{a}{C} \frac{r-r_w}{\sqrt{\chi}} + \frac{a^2 t}{C^2}} \operatorname{erfc} \left(\frac{r-r_w}{2\sqrt{\chi t}} + \frac{a}{C} \sqrt{t} \right) \right] \quad (14)$$

Давление на забое скважины определяется из выражения:

$$\Delta P(r_w, t) = Q \left[\frac{2}{a} \sqrt{\frac{t}{\pi}} - \frac{C}{a^2} \left(1 - e^{\frac{a^2 t}{C^2}} \operatorname{erfc} \left(\frac{a}{C} \sqrt{t} \right) \right) \right] \quad (15)$$

Как и следовало ожидать, при $C \rightarrow 0$ (отсутствие влияния ствола скважины) из уравнения (15) следует выражение (12).

При малых временах ($\frac{a}{C}\sqrt{t} \ll 1$) из уравнения (15) учитывая, что $erfc\left(\frac{a}{C}\sqrt{t}\right) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{a}{C} \sqrt{t}$ получаем:

$$\Delta P(r_w, t) \approx \frac{Qt}{C} \left(1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{a\sqrt{t}}{C} \right) \quad (16)$$

Учитывая, что $C = \frac{\Sigma}{\rho g}$ (Σ – площадь сечения скважины, ρ – плотность флюида, g – ускорение свободного падения), сравнивая уравнение (16) с измеренной зависимостью $\Delta P(r_w, t)$ при заданном дебите Q , можно определить величину $a = \frac{2\pi khr_w}{\mu\sqrt{\chi}}$.

Рассмотрим случай наличия скин-эффекта, при этом условие (8) имеет вид:

$$\frac{Q}{s} = 2\pi \frac{kh r_w}{\mu} \frac{d \Delta \bar{P}(r_w, s)}{d r} + Cs \Delta \bar{P}_w(s) \quad (8')$$

а общее решение уравнения (5), как и раньше, определяется выражением (10). Постоянная C_2 находится, используя условие (8'). Тогда решение задачи имеет вид:

$$\Delta \bar{P}(r, s) = \left(Cs \Delta \bar{P}_w(s) - \frac{Q}{s} \right) \frac{K_0\left(\sqrt{\frac{s}{\chi}} r\right)}{\sqrt{s} a K_1\left(\sqrt{\frac{s}{\chi}} r_w\right)} \quad (17)$$

Подставляя (17) в (7) получаем выражение для определения давления на забое скважины:

$$\Delta \bar{P}_w(s) = -\frac{Q}{s} \frac{K_0\left(\sqrt{\frac{s}{\chi}} r_w\right) + \sqrt{s} \frac{r_w}{\sqrt{\chi}} SK_1\left(\sqrt{\frac{s}{\chi}} r_w\right)}{\sqrt{s} a K_1\left(\sqrt{\frac{s}{\chi}} r_w\right) - Cs \left[K_0\left(\sqrt{\frac{s}{\chi}} r_w\right) + \sqrt{s} \frac{r_w}{\sqrt{\chi}} SK_1\left(\sqrt{\frac{s}{\chi}} r_w\right) \right]} \quad (18)$$

Выражая в (17) $\Delta \bar{P}_w(s)$ согласно (18), получаем окончательное выражение для определения распределения давления с учетом скин-эффекта и влияния объема ствола скважины:

$$\Delta \bar{P}(r, s) = -\frac{Q}{s} \frac{aK_1\left(\sqrt{\frac{s}{\chi}} r_w\right)}{aK_1\left(\sqrt{\frac{s}{\chi}} r_w\right) - C\sqrt{s} \left[K_0\left(\sqrt{\frac{s}{\chi}} r_w\right) + \sqrt{s} \frac{r_w}{\sqrt{\chi}} SK_1\left(\sqrt{\frac{s}{\chi}} r_w\right) \right]} \times$$

$$\times \frac{K_0\left(\sqrt{\frac{s}{\chi}} r_w\right)}{\sqrt{s} a K_1\left(\sqrt{\frac{s}{\chi}} r_w\right)} \quad (19)$$

При отсутствии скин-эффекта $S = 0$ из этого выражения следует (11).

Анализ этих выражений позволяет установить основные закономерности изменения давления на забое скважины с учетом скин-эффекта и влияния ствола скважины.

Для малых времен $\left(\sqrt{\frac{s}{\chi}} r \gg 1, \sqrt{\frac{s}{\chi}} r_w \gg 1\right)$ асимптотические представления выражений (17) и (18) имеют вид:

$$\Delta \bar{P}(r, s) = \left(Cs \Delta \bar{P}_w(s) - \frac{Q}{s} \right) \frac{1}{a\sqrt{s}} \sqrt{\frac{r_w}{r}} e^{-\sqrt{\frac{s}{\chi}}(r-r_w)} \quad (20)$$

$$\Delta \bar{P}_w(s) = -\frac{Q}{s} \cdot \frac{1 + \frac{r_w}{\sqrt{\chi}} S\sqrt{s}}{\sqrt{s} a - Cs \left[1 + \frac{r_w}{\sqrt{\chi}} S\sqrt{s} \right]} \quad (21)$$

При $C = 0$ из (20) следует:

$$\Delta \bar{P}_w(s) = -\frac{Q}{s\sqrt{s} a} \left(1 + \frac{r_w}{\sqrt{\chi}} S\sqrt{s} \right) \quad (22)$$

Используя таблицы преобразований Лапласа из (20) и (22) при $C = 0$ находим оригиналы:

$$\Delta P(r, t) = -\frac{Q}{a} \sqrt{\frac{r_w}{r}} L^{-1} \left[\frac{1}{s\sqrt{s}} e^{-\frac{r-r_w}{\sqrt{\chi}} \sqrt{s}} \right] = -\frac{Q}{a} \sqrt{\frac{r_w}{r}} \left[2 \sqrt{\frac{t}{\pi}} e^{-\frac{(r-r_w)}{4\chi t}} \right] \quad (23)$$

$$\Delta P_w(t) = -\frac{Q}{a} \frac{2\sqrt{t}}{\sqrt{\pi}} - QS \frac{r_w}{a\sqrt{\chi}} \quad (24)$$

Асимптотическое представление выражения (19) для малых времен имеет вид:

$$\Delta P(r, s) = \frac{Q}{s\sqrt{s}} \frac{a}{a - C\sqrt{s} \left(1 + \frac{r_w}{\sqrt{\chi}} S\sqrt{s}\right)} \sqrt{\frac{r_w}{r}} e^{-\frac{s}{\sqrt{\chi}}(r-r_w)} \quad (25)$$

Таким образом, решение поставленной задачи, с учетом приближения на малых временах, описывается следующими выражениями: (12) для $S, C = 0$; (15) для $S = 0, C = var$; (24) для $C = 0, S = var$.

Результаты и их обсуждение

Для анализа решения задачи однородного пласта построен график эволюции давления на забое скважины со временем при различных значениях коэффициента влияния объема ствола скважины – Рисунок 2.1. Решение данной задачи описывается выражением (15).

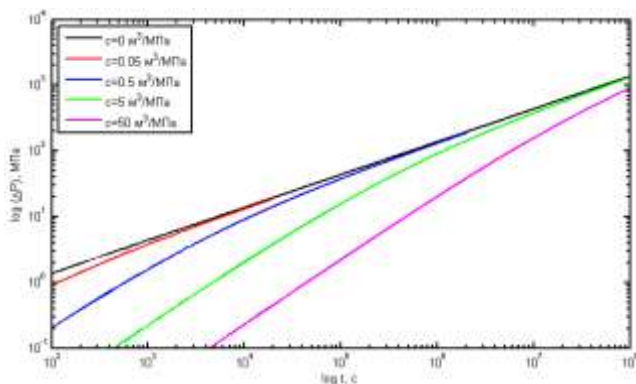


Рис. 2.1. Эволюция давления на забое скважины в однородном пласте при различных значениях коэффициента BCC

Из Рисунка 2.1 видно, что чем больше значение коэффициента BCC, тем позднее начинается изменение давления в скважине. Это объясняется тем, что в начальный момент времени режим работы скважины полностью определяется разгрузкой затрубного простран-

ства, т.е. приток жидкости на поверхность происходит за счет жидкости, находящейся в стволе скважины.

Для проверки чувствительности формулы (15) были построены следующие графики. На Рисунке 2.2а зафиксированы все параметры, кроме проницаемости ($k = 0,0001$ Д, $k = 0,1$ Д, $k = 1$ Д), на Рисунке 2.2б – все кроме вязкости флюида ($\mu = 0,002$ Па·с, $\mu = 0,01$ Па·с, $\mu = 0,1$ Па·с). Коэффициент влияния объема ствола скважины в обоих случаях постоянен и равен $C = 0,5 \frac{\text{м}^3}{\text{МПа}}$.

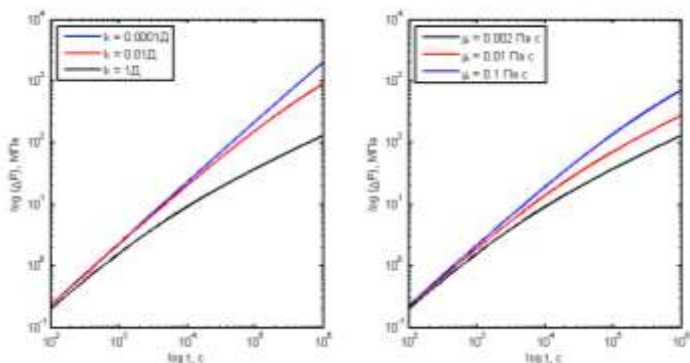


Рис. 2.2. Проверка чувствительности формулы. Эволюция падения давления на забое скважины при различных значениях а) проницаемости; б) вязкости флюида

Из Рисунка 2.2а видно, что чем больше значение проницаемости пласта, тем меньше падение давления на забое. Из Рисунка 2.2б видно, что при увеличении вязкости флюида происходит увеличение падения давления на забое.

Для анализа решения задачи отсутствия влияния объема ствола скважины построен график эволюции падения давления на забое скважины при различных значениях скин-фактора Рисунок 2.3. Решение задачи описывается выражением (24).

Из Рисунка 2.3 видно, что чем больше значение скин-фактора, тем больше перепад давления на забое скважины. Это объясняется тем, что для получения одинаковых дебитов из пластов большей и

меньшей проницаемости, к пласту меньшей проницаемости необходимо приложить больший перепад давлений.

Для проверки чувствительности формулы (24) были построены следующие графики. На Рисунке 2.4а зафиксированы все параметры, кроме проницаемости ($k = 0,0001$ Д, $k = 0,1$ Д, $k = 1$ Д), на Рисунке 2.4б – все кроме вязкости флюида ($\mu = 0,002$ Па·с, $\mu = 0,01$ Па·с, $\mu = 0,1$ Па·с). Скин-фактор при этом $S=10$.

Из Рисунка 2.4а видно, что чем больше значение проницаемости пласта, тем меньше падение давления на забое. Из Рисунка 2.4б видно, что при увеличении вязкости флюида происходит увеличение падения давления на забое.

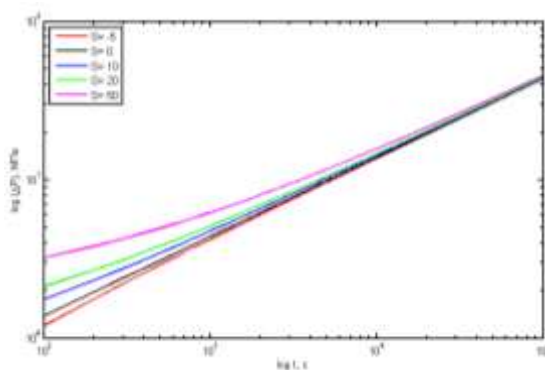


Рис. 2.3. Эволюция давления на забое скважины, в отсутствии влияния объема ствола, при различных значениях скин-фактора

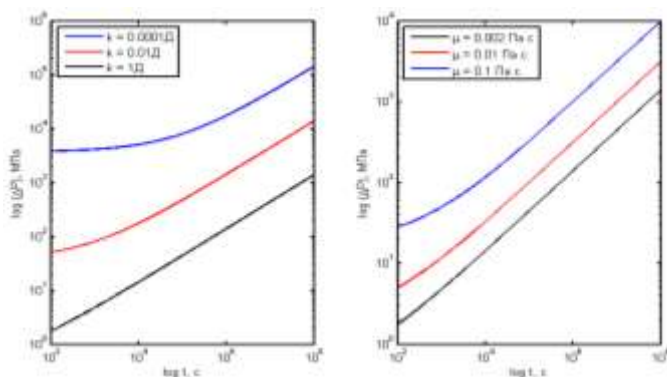


Рис 2.4. Проверка чувствительности формулы. Эволюция падения давления на забое скважины при различных значениях а) проницаемости; б) вязкости флюида

Выводы

В работе представлены результаты математического моделирования фильтрации жидкости к скважине с учетом влияния объема ствола скважины и наличия скин-зоны вокруг скважины.

В работе получены следующие результаты:

1. Построена математическая модель, описывающая фильтрацию жидкости к скважине в плоско-радиальном пласте;

2. В частном случае в однородном пласте и без учета влияния объема ствола скважины ($C, S = 0$), выражение для давления в скважине получено в виде, совпадающем с известными в литературе результатами. Определено, что при уменьшении проницаемости пласта и при увеличении вязкости флюида, перепад давления на забое увеличивается.

3. Так же получено выражение для давления в скважине в однородном пласте с учетом влияния объема ствола скважины ($C \neq 0, S = 0$). Определено, что чем выше коэффициент влияния объема ствола скважины, тем позже начинается перераспределение давления. Это обусловлено тем, что работа скважины на малых временах полностью контролируется разгрузкой затрубного пространства.

4. Получено выражение для давления в скважине в неоднородном пласте без учета влияния объема ствола скважины ($C = 0, S \neq 0$). На основе этого решения определено, что чем выше скин-фактор, тем

больше перепад давления. Это обусловлено тем, что чем меньше проницаемость и чем больше радиус скин-зоны, тем больший перепад давления необходимо создать для получения определенного дебита скважины.

Полученные результаты позволяют количественно определять влияние скин-зоны и эффекта послепритока на распределение давления на забое скважины. Сравнительный анализ полученных теоретических зависимостей $P_w(t)$ с данными экспериментального определения давления на забое скважины служит теоретической основой гидродинамических методов исследования свойств пласта.

Библиографический список

1. Hurst, W. Establishment of the Skin Effect and its Impediment to Fluid Flow into Wellbore // Petroleum Engineering. – 1953. –Р. 136–138.
2. Karman, Biot Mathematical methods in engineering. - McGraw-Hill, 1940. – P.403.
3. Van Everdingen, A. F., Hurst, W. The application of the Laplace Transformation to Flow Problems in Reservoirs // AIME. – 1949. – P. 305–324.
4. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 600 с.
5. Щелкачев В.Н. Основы и приложения теории неустановившейся фильтрации – Монография: в 2 ч. – М.: Нефть и газ, 1995. – с.
6. Эрлагер. Р. мл. Гидродинамические методы исследования скважин, пер. Щебетова А.В., под ред. Хасанова М.М. – М.: Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2006. – 512 с.

Сведения об авторах

Картавцева Ирина Александровна, магистрант БашГУ (Уфа).
E-mail: irina-kartavceva@mail.ru.

Хабибуллин Ильдус Лутфурахманович, доктор физико-математических наук, профессор БашГУ (Уфа). E-mail: habibi.bsu@mail.ru.

Ликонцев А.Н., Лялина А.Ж.

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ СПУТНИКОВОГО КАНАЛА СВЯЗИ СИСТЕМЫ HTS В SIMULINK

В статье приводится описание разрабатываемой модели системы HTS, которая может находить свое применение при планировании систем спутниковой связи HTS, а также при изучении вопросов дальнейшего развития систем спутниковой связи и оценки их качества функционирования.

Ключевые слова: HTS, Simulink, DVB-S2X, моделирование, спутниковый канал связи.

Likontsev A.N., Lyalina A.Z.

THE HTS SYSTEM SATELLITE COMMUNICATION CHANNEL DEVELOPMENT IN SIMULINK

The article describes the HTS system developed model, which can find its application in planning satellite communication systems HTS, as well as in studying the issues of further development of satellite communication systems and assessing their quality of functioning.

Keywords: HTS, Simulink, DVB-S2X, simulation, satellite communication channel.

На сегодняшний день одним из наиболее актуальных и перспективных направлений в развитии технологий спутниковых систем связи является разработка систем высокой пропускной способности «High Throughput Satellite» (HTS). Эти системы способны обеспечивать гораздо большую пропускную способность по сравнению с обычными фиксированными, вещательными и мобильными спутниковыми службами (ФСС, БСС и МСС) за счет использования множества «точечных лучей» для охвата желаемой зоны обслуживания. Такое решение приносит имеет преимущества [1, 2]:

- Возможность получения более высокого усиления передачи/приема: узкий луч способствует увеличению мощности (как передаваемой, так и принимаемой), а значит, позволяет использовать пользовательские терминалы меньшего размера и модуляции более

высоких порядков, таким образом обеспечивая более высокую скорость передачи данных на единицу орбитального спектра.

● Использование повторного использования частот: покрытие желаемой зоны обслуживания множеством точечных лучей позволяет применять различные схемы их расположения и использовать одни и те же полосы частот и с различными поляризациями, что позволяет повысить пропускную способность спутниковой системы.

Немаловажным фактором, влияющим на общую производительность HTS системы является выбор полосы пропускания. Спутники могут быть развернуты в нескольких частотных диапазонах, однако обычно используются диапазоны Ku и Ka [3].

1. В Ka-диапазоне используются более узкие лучи, следовательно, достигается более высокий коэффициент усиления спутниковой антенны, улучшенный бюджет линии, а значит, достигается более высокая пропускная способность для того же размера антенны, что важно, потому что размер антенны может быть ограничен.
2. С уменьшением размера луча снижается температура шума, что позволяет обеспечить более эффективную передачу со стороны удаленной станции.
3. Лучший бюджет канала позволяет использовать схемы модуляции и кодирования более высокого порядка, увеличивая тем самым спектральную эффективность и пропускную способность системы.
4. Ka-диапазон более чувствителен к атмосферным возмущениям. Однако это происходит только в течение очень ограниченных периодов времени и могут быть смягчены с помощью методов смягчения затуханий.
5. Сочетание большей доступности спектра в Ka-диапазоне и более узких лучей позволяет операторам спутников предлагать большую пропускную способность на этих частотах по более конкурентоспособной цене.

Разработка модели Simulink

Разрабатываемая модель собрана из нескольких частей: канала стандарта DVB-S2X и блоков высокочастотной части, включающих расчет потерь в тракте распространения с учетом ослабления из-за осадков. Результат представлен на рис. 1 [4, 5].

В связи с тем, что спутниковый канал связи подвержен влиянию атмосферных воздействий, для повышения достоверности передачи

применяются методы уменьшения влияния затуханий (Fade mitigation techniques (FMT)). Одним из таких методов является алгоритм адаптивного кодирования и модуляции (Adaptive Coding and Modulation (ACM)). При изменении состояния канала на физическом уровне передачи осуществляется динамическая настройка используемой модуляции и кодирования (Modulation and Coding (ModCods)). Так, в случае ясного неба использование высоких скоростей кодирования и порядков модуляции повышает спектральную эффективность, в следствие чего система обеспечивает более высокую пропускную способность. При плохих погодных условиях низкая скорость кодирования и невысокие порядки модуляции повышают надежность передачи с более низкой действующей спектральной эффективностью. Исследовательский вариант данной технологии представлен в разрабатываемой модели.

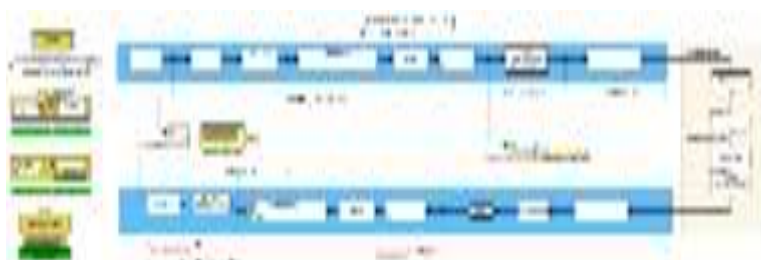


Рис. 1. Разработка модели спутникового канала связи системы HTS

Разрабатываемую модель можно успешно применять в различных исследованиях касательно как особенностей стандарта DVB-S2X и исследования работы алгоритма АКМ, так и при изучении системы HTS в целом:

- Исследование скорости передачи сигнала в зависимости от выбранного частотного диапазона
- Изучать влияние выбранного ModCod на передачу
- Исследовать помехоустойчивость системы при наличии атмосферных осадков разной степени в выбранном частотном диапазоне.
- Исследовать спектральную эффективность в зависимости от значения отношения сигнал/шум.

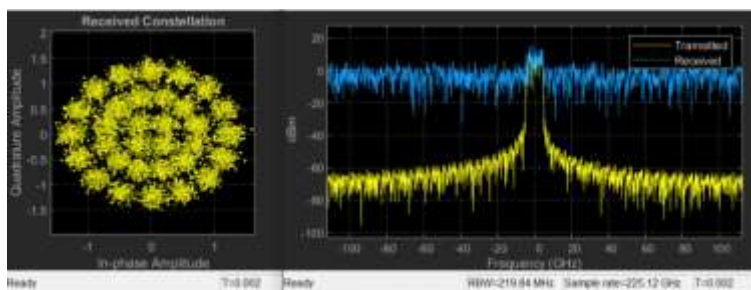


Рис. 2 Сигнальное созвездие и график спектральной плотности мощности

При проверке работоспособности системы были проведены различные исследования, результаты которых отображены на рис. 3. Как следствие, можно сделать несколько выводов:

- Для большой области покрытия целесообразнее использовать Ку диапазон, так как Ка-диапазон использует более узкие лучи, а значит, потребуется большой спутниковый ресурс.
- Для уменьшения влияния атмосферных возмущений на передачу в Ка диапазоне требуется больший запас по мощности, чем в Ку диапазоне. Поэтому в регионах, подверженных большому обилию осадков выгодней работать в Ку-диапазоне.
- При увеличении порядка модуляции, можно получить увеличение скорости передачи при той же полосе пропускания, что активно используется в современных системах. Кроме того, заметно, что Ка-диапазон позволяет многократно увеличить скорость передачи для высоких порядков модуляции.
- Методы адаптации режима действительно позволяют справиться с замираниями, вызванными ослаблением в атмосферных дождях.
- Наблюдается прямая зависимость между значением отношения сигнал/шум и спектральной эффективностью. Следовательно необходимо находить компромисс между спектральной эффективностью и коэффициентом битовых ошибок. С одной стороны, спектральная эффективность выше необходимой ведет к увеличению пропускной способности, а значит, к излишней частоте возникновения ошибок для системы. С другой стороны, использование ModCod со слишком

низкой спектральной эффективностью ведет к невыгодному использованию мощности системы.

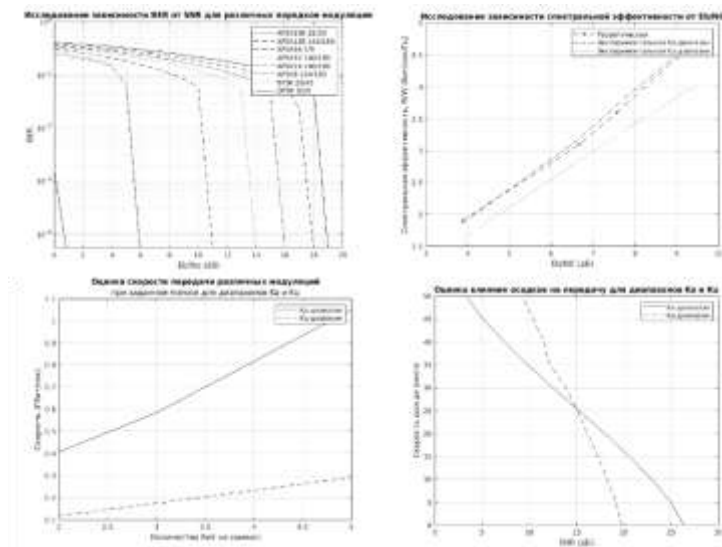


Рис. 3. Результаты исследования работоспособности разрабатываемой модели: а) Исследование влияния выбранного ModCod на передачу; б) Исследование спектральной эффективности системы; в) Исследование скорости передачи сигнала в зависимости от выбранного частотного диапазона; г) Исследование помехоустойчивости системы при наличии атмосферных осадков разной степени в выбранном частотном диапазоне

Модель спутникового канала связи системы HTS использует современные технологии: AKM, DVB-S2X, параметры системы HTS. Также программа имеет дружелюбный пользовательский интерфейс: позволяет устанавливать практически любые параметры канала, такие как расстояние до земли, шумовые температуры, силу осадков, частоты, диаметры антенн, их усиление и т.п. через один задающий блок. Ответной реакцией модели является вычисление отношения сигнал/шум, коэффициент ошибок в передаче пакетов, коэффициент битовых ошибок, получение сигнального созвездия и графика спектральной плотности мощности передаваемого и принимаемого сигнала.

Кроме того, модель можно легко расширить для увеличения количества возможных исследований. За небольшими доработками можно успешно проводить исследования воздействия различных замираний на передачу, изучать работу МИМО-систем, а также оценивать производительность взаимосвязи сети 5G и HTS.

Библиографический список

1. Ликонцев А.Н., Лялина А. Ж. Моделирование спутникового канала связи на основе системы HTS // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании: Материалы IX-й Международной научно-технической и научно-методической конференции: сб. науч. ст. СПб.: СПбГУТ, 2020 Т. 3. С. 273–278.
2. Лялина А.Ж. Исследование особенностей системы HTS при использовании разработанной в среде MATLAB модели канала связи // 74-я региональная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Студенческая весна – 2020»: сб. науч. ст. СПб.: СПбГУТ, 2020 Т. 1. С. 69–73.
3. Richard Swinford, Bertrand Grau. High Throughput Satellites: Delivering future capacity needs, Arthur D. Little, 2015.
4. ETSI Standard EN 302 307 V1.1.1: Digital Video Broadcasting (DVB); Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications (DVB-S2), European Telecommunications Standards Institute, Valbonne, France, 2005-03.
5. ETSI Standard EN 302 307-2 V1.1.1: Digital Video Broadcasting (DVB); Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications; Part 2: DVB-S2 Extensions (DVB-S2X) European Telecommunications Standards Institute, Valbonne, France, 2014-10.

Сведения об авторах

Ликонцев Алексей Николаевич, E-mail: Likontsev-rts@mail.ru.
Лялина Анна Жановна, E-mail: lyalinanna@gmail.com.

Миловзоров Д.Г., Ясовеев В.Х.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОПРАВОЧНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ
ТРЕХКОМПОНЕНТНОГО ФЕРРОЗОНДОВОГО
МАГНИТОМЕТРА**

В статье рассматриваются трехкомпонентные феррозондовые магнитометрические преобразователи и методика определения углов, характеризующих конкретное пространственное позиционирование измерительных преобразователей в корпусе прибора и вносящих инструментальные погрешности. Предложена методика определения поправочных коэффициентов путем их итерационного варьирования.

Ключевые слова: магнитометр, поправочные коэффициенты, трехкомпонентный феррозондовый преобразователь, итерационное варьирование.

Milovzorov D.G., Yasoveev V. Kh.

**CORRECTION FACTORS DETERMINATION
OF THREE-COMPONENT FLUXGATE MAGNETOMETER**

The article discusses three-component fluxgate magnetometric transducers and the method for determining the angles that characterize the specific spatial positioning of the measuring transducers in the instrument case and adds instrumental errors. A method for determining the correction factors by their iterative variation is proposed.

Keywords: magnetometer, correction factors, three-component fluxgate transducer, iterative variation.

Трехкомпонентный феррозондовый магнитометр предназначен для измерения трех проекций вектора индукции магнитного поля на три оси ориентированных перпендикулярно друг другу первичных преобразователя. По трем измеренным проекциям могут быть вычислены:

– угол в горизонтальной плоскости относительно направления на север магнитного меридиана Земли, называемый азимутом;

– угол между направлением вектора магнитной индукции поля и направлением вектора ускорения свободного падения, называемый углом магнитного наклона;

– модуль полного вектора магнитного поля, определяемый из соотношения:

$$|\vec{B}| = \sqrt{b_x^2 + b_y^2 + b_z^2},$$

где b_x , b_y и b_z – приведенные измеряемые проекции тремя ортогональными феррозондовыми преобразователями, изменяемые в диапазоне ± 1 отн. единиц.

Трехкомпонентные феррозондовые магнитометры применяются при построении геонавигационных измерительных систем, системах контроля параметров пространственной ориентации объектов, в системах обнаружения локальных искажений геомагнитного поля в неферромагнитных укрывающих средах (земле, воде, снеге и т.д.), выходящих из ферромагнитных объектов искусственного происхождения, и т.д. [1,2].

Наиболее важным требованием, предъявляемым к современным трехкомпонентным феррозондовым преобразователям, является обеспечение высокой точности определения ортогональных проекций полного вектора магнитной индукции, что непосредственно связано с метрологическими характеристиками применяемых датчиков [3].

Прямым решением задачи обеспечения повышенных точностных характеристик таких приборов является приведение в соответствие измеряемых компонент с их действительными значениями в конкретных точках путем уменьшения инструментальных погрешностей, присутствие ненулевых значений которых в результатах измерений обуславливается наличием угловых параметров отклонения осей чувствительности датчиков от осей прямоугольной системы координат корпуса преобразователя $OXYZ$, (рис. 1):

- 1) δ_x – угол отклонения феррозонда F_x от оси OX в плоскости OXZ ;
- 2) χ – угол отклонения феррозонда F_x от оси OX в плоскости OXY ;
- 3) δ_y – угол отклонения феррозонда F_y от оси OY в плоскости OYZ ;
- 4) γ – угол отклонения феррозонда F_y от оси OY в плоскости OXY ;
- 5) σ_1 – угол отклонения феррозонда F_z от оси OZ в плоскости OYZ ;
- 6) σ_2 – угол отклонения феррозонда F_z от оси OZ в плоскости OXZ .

Для уменьшения инструментальных погрешностей трехкомпонентного магнитометра применяют метод алгоритмической коррекции погрешностей определения измеряемых проекций с применением

поправочных коэффициентов, выполняемый на этапе обработки измеренных данных.

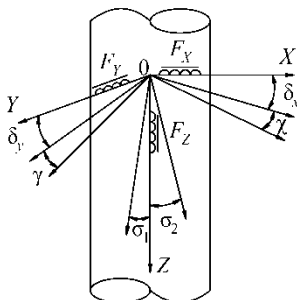


Рис. 1 – Угловые параметры отклонения осей чувствительности датчиков от осей базисов корпуса преобразователя

Данный метод требует точно определенных численных значений поправочных коэффициентов трехкомпонентного магнитометра (рис. 1), экспериментальное определение которых при использовании классического подхода калибровки является трудоемким процессом и требует высокой квалификации персонала и прецизионного оборудования.

Для определения численных значений углов отклонений трехкомпонентного магнитометра δ_x , γ , δ_y , σ_1 и σ_2 (рис. 1) предлагается автоматизированный метод определения их численных значений, основанный на итерационном варьировании. Суть предлагаемого метода заключается в следующем.

Исследуемый магнитометр помещается в области, характеризующейся отсутствием искажений естественного геомагнитного поля вдали от массивных ферромагнитных предметов. На начальном этапе формируется экспериментальная база данных. Задается несколько произвольных положений прибора в пространстве. При каждом конкретном положении прибора осуществляется измерение приведенных значений проекций вектора магнитной индукции магнитного поля с феррозондовых датчиков $b_{i(i=x,y,z)}$ и заносятся в массив экспериментальных данных. При этом приведенные значения измеряемых проекций вектора индукции геомагнитного поля $\vec{B}$ определяются из следующей зависимости:

$$b_{i(i=x,y,z)} = \frac{B_{i(i=x,y,z)}}{|\vec{B}|},$$

где $B_{i(i=x,y,z)}$ – измеряемые проекции с феррозондовых датчиков в кодах АЦП, $|\vec{B}|$ – модуль вектора индукции геомагнитного поля $\vec{B}$ в кодах АЦП.

Для таких изменений пространственного положения корпуса прибора при проведении процесса варьирования используется главный критерий: вариации значений модулей вектора магнитной индукции должны иметь минимальные значения:

$$\Delta B_i = 1 - \sqrt{b_x^2 + b_y^2 + b_z^2} \rightarrow \min,$$

то есть

$$B_i = \sqrt{b_x^2 + b_y^2 + b_z^2} \rightarrow 1.$$

Измеряемые проекции $b_{i(i=x,y,z)}$ трехкомпонентного феррозондового датчика определяются по известным математическим моделям [4-5]:

$$\left. \begin{aligned} b_x &= ax + by + cz \\ b_y &= dx + ey + fz \\ b_z &= kx + ly + mz \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где поправочные коэффициенты, определяемые значениями малых угловых параметров отклонения осей чувствительности феррозондов, вычисляются по зависимостям:

$$\begin{aligned} a &= \cos\delta_x \cdot \cos\chi; & b &= \cos\delta_x \cdot \sin\chi; & c &= -\sin\delta_x; \\ d &= -\cos\delta_y \cdot \sin\gamma; & e &= \cos\delta_y \cdot \cos\gamma; & f &= \sin\delta_y; \\ k &= \cos\sigma_1 \cdot \sin\sigma_2; & l &= -\sin\sigma_1; & m &= \cos\sigma_1 \cdot \cos\sigma_2. \end{aligned}$$

В общем случае измеряемые сигналы с феррозондов в виде цифровых кодов определяются следующим выражением [6]:

$$D_i = S_i + R_i(b_i), \quad (2)$$

где $S_i = \frac{Mx_i + Mn_i}{2}$; $R_i = \frac{Mx_i - Mn_i}{2}$; $b_{i(i=x,y,z)}$ – приведенные значения

измеряемых проекций полного вектора магнитной индукции $\vec{B}$ на оси чувствительности феррозондов [7]; Mx_i и Mn_i – максимумы и минимумы выходных кодов с каждого феррозондового датчика.

Таким образом, определение поправочных коэффициентов заключается в вычислении значений малых угловых параметров откло-

нения осей чувствительности феррозондов для каждого из трехкомпонентных датчиков.

На первом шаге варьирования задаются начальные значения угловых параметров, которые нужно определить, используя значения сигналов с феррозондов из массива экспериментальных данных. Дается грубый шаг варьирования.

На данном шаге обрабатываются значения сигналов с феррозондов и вычисленные значения проекций b_i по выражениям (1). Эти значения формируют массив данных, из которого можно вычислить значения модуля вектора магнитной индукции B_i и определить численные значения их вариаций при каждом наборе значений параметров $\delta_{хв}$, χ_v , δ_{yv} , γ_v , σ_{1v} и σ_{2v} :

$$\Delta B_i = 1 - B_i,$$

где ΔB_i – значения вариаций относительно 1.

Далее определяется максимальное значение этих вариаций:

$$\Delta B_{j\max} = \max(\Delta B_i).$$

Затем производится последовательное увеличение значения параметров $\delta_{хв}$, χ_v , δ_{yv} , γ_v , σ_{1v} и σ_{2v} , пока не будут достигнуты заданные конечные значения диапазона варьирования. На каждом шаге определяются минимальные вариации:

$$\Delta B_{\min} = \min(\Delta B_{j\max}),$$

и сохраняются соответствующие им значения параметров $\delta_x = \delta_{хв}$, $\chi = \chi_v$, $\delta_y = \delta_{yv}$, $\gamma = \gamma_v$, $\sigma_1 = \sigma_{1v}$ и $\sigma_2 = \sigma_{2v}$.

При выполнении последующей итерации происходит уменьшение на порядок шага варьирования *Step*, начальным значениям присваиваются сохраненные значения малых угловых параметров, и проведение вышеописанных операций осуществляется заново.

На заключительном шаге определяются поправочные коэффициенты $a \dots t$ из (1), позволяющие производить компенсацию погрешностей измерения трех проекций вектора магнитной индукции трехкомпонентным феррозондовым магнитометром и увеличить результирующую точность измерений.

Рассмотренный в статье подход к определению поправочных коэффициентов трехкомпонентного феррозондового магнитометра позволяет производить расчет угловых параметров отклонений датчиков магнитометра, используя экспериментальный массив данных. Представленный метод итерационного варьирования параметров трехкомпонентных феррозондовых преобразователей является автоматизированным и при соответствующем математическом и про-

граммном обеспечении оказывается простым в его практической реализации.

Библиографический список

1. Любимов В.В. Диагностические магнитометры для проведения электромагнитного мониторинга в условиях города и современные методы и средства индивидуально-массовой визуализации его результатов. Обзор. Препринт № 6 (1116). М.: ИЗМИРАН, 1998.

2. Щербаков Г.Н. Обнаружение объектов в укрывающих средах. Для криминалистики, археологии, строительства и борьбы с терроризмом. М.: Арбат-Информ, 1998.

3. Афанасьев Ю.В. Феррозондовые приборы. Л.: Энергоатомиздат, 1986. 188 с.

4. Milovzorov D. G., Yasoveev V. Kh. Mathematical modeling of fluxgate magnetic gradiometers, Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing, 2017. Т. 53. № 4. С. 388-394.

5. Milovzorov D. G., Yasoveev V. Kh. Mathematical Modeling of a Compact Three-Component Azimuth Fluxgate Sensor / D. G. Milovzorov, V. Kh. Yasoveev // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. 2018. V. 54. № 5. Pp 463–468.

6. Milovzorov D. G., Yasoveev V. Kh. Angular installation options errors correction for three-component vector-measuring transducers with accelerometer at calibration phase. 2017 2nd International Ural Conference on Measurements (UralCon), Chelyabinsk, Russia, 2017. DOI: 10.1109/URALCON.2017.8120682. Pp. 23-28.

7. Миловзоров Д.Г., Ясовеев В.Х. Математическое моделирование трехкомпонентных магнитометров. САПР и моделирование в современной электронике: сб. науч. тр. II Международной научно-практической конференции / под ред. Л.А. Потапова, А.Ю. Дракина. Брянск: БГТУ, 2018. – Ч.1. – С. 175-178 .

Сведения об авторах

Миловзоров Дмитрий Георгиевич, кандидат технических наук, доцент ФГБОУ ВО «УГАТУ» (Уфа). E-mail: dgmilovzorov@yandex.ru.

Ясовеев Васих Хаматович, доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО «УГАТУ» (Уфа). E-mail: yasov@mail.ru.

УДК 519.63:517.958

Нафикова А.Р., Кризский В.Н.

**О РАЗРАБОТКЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА РАДОНА В
АНИЗОТРОПНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДАХ**

В работе представлено описание комплекса программ, разработанного средствами компьютерной системы Maple в соответствии с предложенным способом решения трехмерной задачи диффузии-адвекции радона в кусочно-постоянных слоистых средах с включениями, учитывающей анизотропию диффузионных свойств подобластей геологической среды.

Ключевые слова: диффузия-адвекция радона, анизотропная среда, краевая задача, математическая модель, метод интегральных преобразований и интегральных представлений, программный комплекс.

Nafikova A.R., Krizsky V.N.

**ON THE DEVELOPMENT OF SOFTWARE FOR THE STUDY OF
RADON TRANSPORT PROCESSES IN ANISOTROPIC
GEOLOGICAL MEDIA**

The paper describes a set of programs developed by means of the Maple computer system in accordance with the proposed method for solving the three-dimensional problem of radon diffusion-advection in piecewise constant layered media with inclusions, taking into account the anisotropy of the diffusion properties of subsurface geological medium.

Keywords: radon diffusion-advection, anisotropic medium, boundary value problem, mathematical model, method of integral transformations and integral representations, software package.

Математическое моделирование процессов распределения радона в грунте и его стока в приземный слой атмосферы связано с решением параболических краевых задач математической физики. Разработка математических моделей, алгоритмов решения и программ расчета процессов распространения радона – актуальная задача, имеющая практическое значение во многих научных направлениях и областях.

Так, в работе [1] построена математическая модель трехмерной задачи диффузии-адвекции радона в кусочно-постоянных слоистых средах с включениями, учитывающая анизотропию диффузионных свойств подобластей геологической среды (1):

$$\begin{aligned} \frac{\partial A_{i,j}(P,t)}{\partial t} &= \operatorname{div}(D_{i,j} \bar{\nabla} A_{i,j}(P,t)) + \nu_{i,j} \frac{\partial A_{i,j}(P,t)}{\partial z} - \lambda(A_{i,j}(P,t) - A_{i,\infty}), \\ P &= P(x, y, z) \in \Omega_{i,j}, i = \overline{0, N}, j = \overline{0, M_i}; \\ ((D_{i,0} \bar{\nabla} A_{i,0}(P,t), \bar{n}) + \nu_{i,0} A_{i,0}(P,t)) \Big|_{\gamma_{i,0}} &= ((D_{i+1,0} \bar{\nabla} A_{i+1,0}(P,t), \bar{n}) + \\ &+ \nu_{i+1,0} A_{i+1,0}(P,t)) \Big|_{\gamma_{i,0}}, i = \overline{0, N-1}; \\ A_{i,0}(P,t) \Big|_{\gamma_{i,0}} &= A_{i+1,0}(P,t) \Big|_{\gamma_{i,0}}, i = \overline{0, N-1}; \\ ((D_{i,j} \bar{\nabla} A_{i,j}(P,t), \bar{n}) + \nu_{i,j} A_{i,j}(P,t)) \Big|_{\gamma_{i,j}} &= (D_{i,0} \bar{\nabla} A_{i,0}(P,t), \bar{n}) + \nu_{i,0} A_{i,0}(P,t) \Big|_{\gamma_{i,j}}, \quad (1) \\ i &= \overline{0, N}, j = \overline{1, M_i}; \\ A_{i,j}(P,t) \Big|_{\gamma_{i,j}} &= A_{i,0}(P,t) \Big|_{\gamma_{i,j}}, i = \overline{0, N}, j = \overline{1, M_i}; \\ \lim_{z \rightarrow \infty} A_{N,0}(P,t) &= A_{N,\infty}, \lim_{z \rightarrow -\infty} A_{0,0}(P,t) = 0; \\ \lim_{P \in \Omega_{i,j}, \sqrt{x^2+y^2} \rightarrow \infty} A_{i,0}(P,t) &= A_i(P,t), i = \overline{0, N}; \\ A_{i,j}(P,0) &= 0, i = \overline{0, N}, j = \overline{0, M_i}. \end{aligned}$$

Здесь $A_{i,j}(P,t)$ – функция объемной активности радона (ОАР) в грунте, $A_{i,j}(P,t) \in C_P^2(\Omega) \cap C_P^1(\gamma_{i,j}) \cap C_t^1(\Omega)$; λ – постоянная распада радона; $A_{i,\infty}$ – ОАР, находящегося в радиоактивном равновесии с радием (^{226}Ra) на заданной глубине в грунте i -го слоя, которая равна $A_{i,\infty} = K_{i,em} A_{i,Ra} \rho_{i,s} (1 - \eta_i)$, где $K_{i,em}$ – коэффициент эманирования радона, $A_{i,Ra}$ – удельная активность ^{226}Ra , $\rho_{i,s}$ – плотность твердых частиц, η_i – пористость грунта, $A_i(P,t)$ – нормальное поле радона, описывающее диффузию-адвекцию радона в слоистой среде в предположении отсутствия включений;

$$\gamma_{i,0} = \left\{ \gamma_{i,0}(x, y) \mid \gamma_{i,0} \rightarrow z_i = \text{const } n_{pu} \sqrt{x^2 + y^2} \rightarrow \infty \right\} \quad (i = \overline{0, N}) \quad -$$

гладкие параметрические заданные границы горизонтально-слоистой среды, разделенной ими на горизонтальные слои $\Omega_{0,0}, \Omega_{1,0}, \dots, \Omega_{N,0}$, заполненные веществом, диффузионные свойства которых описы-

$$\text{ются симметричными тензорами } D_{i,0} = \begin{pmatrix} d_{xx}^{i,0} & d_{xy}^{i,0} & d_{xz}^{i,0} \\ d_{xy}^{i,0} & d_{yy}^{i,0} & d_{yz}^{i,0} \\ d_{xz}^{i,0} & d_{yz}^{i,0} & d_{zz}^{i,0} \end{pmatrix} \text{ и скоро-}$$

стями адвекции $v_{0,0}, v_{1,0}, v_{2,0}, \dots, v_{N,0}$ соответственно. Каждый слой $\Omega_{i,0}$ содержит M_i локальных включений $\Omega_{i,j}$ ($j = \overline{1, M_i}$) с границами $\gamma_{i,j}$, заполненных веществом, физические свойства которых описываются постоянными симметричными тензорами диффузии

$$D_{i,j} = \begin{pmatrix} d_{xx}^{i,j} & d_{xy}^{i,j} & d_{xz}^{i,j} \\ d_{xy}^{i,j} & d_{yy}^{i,j} & d_{yz}^{i,j} \\ d_{xz}^{i,j} & d_{yz}^{i,j} & d_{zz}^{i,j} \end{pmatrix} \quad \text{и} \quad \text{скоростями} \quad \text{адвекции}$$

$v_{i,j}$, $i = \overline{0, N}$, $j = \overline{1, M_i}$. Если область $\Omega_{0,0}$ – приземный слой атмосферы, то в задаче (1) следует положить $A_{0,\infty} = 0$. При $M_0 > 0$ включения $\Omega_{0,1}, \dots, \Omega_{0,M_0}$ могут описывать жилые и производственные сооружения. Переменная $t \geq 0$ – время.

Предложен комбинированный способ решения данной задачи на основе методов интегральных преобразований, интегральных представлений и граничных интегральных уравнений, и построен алгоритм расчета поля ОАР [1].

Для реализации алгоритмов решения поставленной задачи разработан комплекс программ для работы в среде операционных систем Windows XP/Vista/7/8/10. В качестве средства разработки использован программный пакет – система компьютерной алгебры Maple, имеющая собственный встроенный язык программирования.

Данный комплекс обладает следующими средствами и возможностями: задание параметров описания модели; нахождение функции нормального поля радона в кусочно-однородной горизонтально-слоистой среде с плоскопараллельными границами; вычисление

функции Грина в горизонтально-слоистой среде с плоскопараллельными границами; определение функции аномального поля радона, учитывающей влияние одного или нескольких включений; графического отображения результатов расчетов.

С помощью разработанного программного комплекса проведены сравнения с известными моделями для случая однородных кусочно-постоянных сред и вычислительные эксперименты по исследованию процессов диффузии-адвекции радона в кусочно-постоянных анизотропных слоистых средах с включениями и взаимному влиянию параметров математической модели. Выявлено, что учет анизотропии при моделировании процессов переноса радона в геологических средах приводит к существенному изменению поля объемной активности радона и является значимым фактором, необходимым при описании математической модели поля в реальных геологических средах [2].

Адекватность полученных теоретических решений наиболее удобно апробировать на лабораторных моделях, позволяющих точно учитывать все исходные расчетные параметры. Так, в работе [2] представлены результаты сравнительного сопоставления данных вычислительного и натурального экспериментов по исследованию процессов переноса радона в кусочно-постоянных анизотропных слоистых средах с включениями также показали адекватность и достоверность предложенных модели и метода решения задачи.

Таким образом, разработанное, апробированное и зарегистрированное математическое и программное обеспечение моделирования процессов переноса радона в анизотропных геологических средах [4] позволит производить расчет динамических полей диффузии-адвекции радона, интерпретировать результаты полевых измерений, осуществлять зонирование, определяя границы сред промыслового района по данным полевых и скважинных измерений объемной активности поля радона. Данный программный комплекс может быть применен в дозиметрических и геофизических целях: радоновой дозиметрии в жилых и производственных помещениях, поиске и оконтуривании урановых, нефтяных и газовых месторождений, предсказании землетрясений, а также для проведения научных исследований. Алгоритмы, лежащие в основе программного комплекса, могут быть использованы в учебном процессе в качестве примеров при решении задач математической физики.

Результаты проведенных научных исследований позволили перейти к постановке обратной задачи переноса радона. Так, в работе

[5] представлена математическая модель обратной геометрической задачи поиска границы локального включения. В настоящий момент ведутся обсуждения о разработке и применении параллельных алгоритмов решения поставленной обратной задачи, что в перспективе позволит получить высокопроизводительное программное обеспечение решения обратной задачи переноса радона в анизотропных геологических средах.

Библиографический список

1. Кризский В.Н., Нафикова А.Р. Математическое моделирование процессов диффузии-адвекции радона в кусочно-постоянных анизотропных слоистых средах с включениями // Вестник ЮУрГУ. Математическое моделирование и программирование. 2014. № 2. С. 38-45.
2. Кризский В.Н., Нафикова А.Р., Козлова И.А., Юрков А.К. Математическое моделирование процесса переноса радона в анизотропных средах // Математические заметки СВФУ. 2020. Т. 27, № 1. С. 88-100.
3. Нафикова А.Р., Кризский В.Н. Математическое моделирование процессов переноса радона в кусочно-постоянных анизотропных слоистых средах с включениями: монография. Стерлитамак: Стерлитамакский филиал БашГУ, 2016. 87 с.
4. Нафикова А.Р., Кризский В.Н. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020615152 «Решение прямой задачи переноса радона в анизотропных геологических средах», 18.05.2020 г. // Федеральная служба по интеллектуальной собственности (РосПатент).
5. Krizsky V.N., Nafikova A.R., Kozlova I.A. and Yurkov A.K. Research of radon transport processes in anisotropic media // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. 1479 (2020) 012068.

Сведения об авторах

Нафикова Альбина Ринатовна, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры программирования и вычислительной математики Башкирского государственного педагогического университета им. М. Акмуллы (Уфа). E-mail: albinabikbaeva@gmail.com.

Кризский Владимир Николаевич, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры информатики и компьютерных технологий Санкт-Петербургского Горного Университета (Санкт-Петербург). E-mail: krizsky@rambler.ru.

Нестеров В.Н.

**КОНЦЕПЦИЯ ВЕКТОРНЫХ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ
ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН: ОТ КОНЦЕПЦИИ К МОДЕЛЯМ,
ОТ МОДЕЛЕЙ К ИЗМЕРЕНИЯМ**

В работе дано определение и обоснована концепция векторной многокомпонентной физической величины, расширяющие понятийный аппарат метрологического стандарта. На базе положений концепции построены математические модели многокомпонентных перемещений объектов, информативные составляющие которых подлежат измерению.

Ключевые слова: концепция, физическая величина, многокомпонентная величина, модели, измерения.

Nesterov V.N.

**THE CONCEPTION OF VECTOR MULTICOMPONENT
PHYSICAL QUANTITIES: FROM CONCEPTION TO MODELS,
FROM MODELS TO MEASUREMENTS**

The paper gives the definition and substantiates the conception of the vector multi-component physical quantity, which expanded the conceptual apparatus of the metrological standard. Based on this concept, mathematical models of multicomponent displacements of objects are built, the informative components of which are to be measured.

Keywords: concept, physical quantity, multicomponent quantity, models, measurements.

Введение

Термины «величина», «физическая величина», «измеряемая физическая величина» являются ключевыми в теории измерений. Понятие физической величины интегрирует в себе понятия рода, размера, единицы измерения и значения, которые позволяют наполнить физическим смыслом и количественным содержанием исходную априори неопределенность в той или иной области знаний [1]. При этом сформулированная в стандарте [1] качественная определенность величины опирается на понятие размерности. Однородными признаются величины, имеющие одну физическую размерность, например, длина и

диаметр изделия. Тот же стандарт вводит понятие производной величины как величины, входящей в систему величин и определяемую через основные величины этой системы, каждая из которых имеет свою размерность. Например, скорость является производной двух величин – расстояния и времени. Сила является производной величины от массы и ускорения, последняя из которых также производная величина. Очевидно, возникновение и развитие перечисленных терминов являются закономерным следствием усложнения объектов и явлений, попадающих в сферу жизненных интересов человека. Поэтому, имея в виду диалектику познания, следует ожидать дальнейшего развития в затронутой предметной области. Действительно, если рассматривать физическую величину как свойство материального объекта или явления, возникает вопрос об источниках этого свойства, источниках, которые приводят к изменению этой величины, но имеют разные причины и, возможно, разную природу. При этом результирующие значения величин, интегрируя в себе действие разных источников, имеют одинаковую физическую размерность, то есть являются однородными. А между тем упомянутые источники, проявляясь в них интегрально, могут представлять и представляют зачастую больший интерес, чем сама упомянутая величина. По существу речь идет о системе величин, имеющих одну физическую размерность, часто совпадающий или перекрывающийся в значительной степени спектральный диапазон и проявляющих свое действие в результирующей величине той же размерности, но несущих дополнительную информацию о причинах или источниках, характеризующих сложный объект или явление.

Такой взгляд на физическую величину, выводя ее за пределы терминологии, предписанной стандартом [1] и исходя из потребностей практики, привел к необходимости новых формулировок, моделей и методов измерения таких величин.

Всесторонний анализ проблемы и экскурс в ряд технических приложений привел к концепции векторных многокомпонентных физических величин [2, 3], которая, например, находит применение в задачах определения информативных составляющих сложных многокомпонентных перемещений и деформаций объектов разной степени сложности.

Концепция векторной многокомпонентной физической величины и ее модели

Первые идеи, положенные в основу концепции, зародились в процессе анализа результатов испытаний авиационных газотурбинных двигателей на различных режимах их работы, в процессе которых элементы двигателей претерпевают сложные перемещения и деформации. При этом источники названных перемещений и деформаций часто имеют разную природу и значимость, а в совокупности отражаются на результирующих технико-экономических показателях. Наличие таких источников объясняется конструктивной сложностью и энергетической насыщенностью газотурбинных двигателей, представляющих собой подвижную систему, на которой отражается все: изменение температур и оборотов, нестационарный теплообмен, вытяжка в замках лопаток, прецессия роторов, перепады давлений рабочего тела, переходные процессы при изменении режимов, вибрации, конструкционные дефекты узлов и агрегатов и многое другое. Выявления вклада каждого источника в результирующие перемещения элементов конструкции в соответствующее время и в выбранных точках имеет принципиальное значение для оценки и выявления конструктивных просчетов, выработки перспективных технических решений.

Таким образом, результирующая векторная величина – перемещение по существу является многокомпонентной, каждая из компонент которой несет в себе информацию об источниках и причинах их появления и изменения.

Взгляд на векторную величину как на величину многокомпонентную, отражающую в интегральной форме многообразие процессов, приводящих к сложным перемещениям и деформациям как сложных, так и простых объектов, привел к осознанию и необходимости формирования соответствующей концепции.

В работах [2, 3] дано следующее определение концепции: если контролируемые объекты и связанные с ними процессы имеют сложный характер и (или) структуру, то перемещения, являющиеся их следствием, сами характеризуются определенной структурой, элементы которой связаны между собой каким-либо образом, находятся во взаимодействии, оказывают взаимное влияние друг на друга и несут дополнительную информацию о процессе или объекте.

Основу концепции векторных многокомпонентных физических величин составляют следующие три положения [2-4]:

– векторные многокомпонентные физические величины рассматриваются как функции множества составляющих их информативных компонентов;

– функции связи названных информативных компонентов в моделях многокомпонентных физических величин определяются законами векторной алгебры;

– информационные модели векторных многокомпонентных физических величин допускают многовариантность представления указанных информативных составляющих.

Тогда математическая модель векторной многокомпонентной физической величины, включающая в себя информативные компоненты той же размерности и отражающая сложные процессы, происходящие с объектом, представляется в разложении по осям декартовой системы координат в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{X}_x(\mathbf{r}, \tau) &= \mathbf{F}(\mathbf{x}_{1x}(\mathbf{r}, \tau), \dots, \mathbf{x}_{px}(\mathbf{r}, \tau)); \\ \mathbf{X}_y(\mathbf{r}, \tau) &= \mathbf{F}(\mathbf{x}_{1y}(\mathbf{r}, \tau), \dots, \mathbf{x}_{py}(\mathbf{r}, \tau)); \\ \mathbf{X}_z(\mathbf{r}, \tau) &= \mathbf{F}(\mathbf{x}_{1z}(\mathbf{r}, \tau), \dots, \mathbf{x}_{pz}(\mathbf{r}, \tau)), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $\mathbf{X}_x(\mathbf{r}, \tau)$, $\mathbf{X}_y(\mathbf{r}, \tau)$, $\mathbf{X}_z(\mathbf{r}, \tau)$ – проекции многокомпонентных перемещений на координатные оси декартовой системы координат; $\mathbf{x}_{1k}(\mathbf{r}, \tau), \dots, \mathbf{x}_{pk}(\mathbf{r}, \tau)$ – информативные компоненты k -й координатной составляющей ($k \in \{x, y, z\}$) многокомпонентного перемещения $\mathbf{X}$; $\mathbf{r}, \tau$ – пространственные и временные координаты; $\mathbf{F}$ – функция связи, определяемая физикой исследуемого объекта или процесса.

Данная модель является основополагающей и непосредственно вытекает из сформулированных выше положений концепции.

В соответствие с физикой процессов перемещения и вторым положением концепции модель (1) может быть конкретизирована с представлением результирующей величины в виде векторной суммы соответствующих информативных составляющих (компонентов):

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{X}_x(\mathbf{r}, \tau) &= \sum_{j=1}^p \mathbf{x}_{jx}(\mathbf{r}, \tau); \\ \mathbf{X}_y(\mathbf{r}, \tau) &= \sum_{j=1}^p \mathbf{x}_{jy}(\mathbf{r}, \tau); \\ \mathbf{X}_z(\mathbf{r}, \tau) &= \sum_{j=1}^p \mathbf{x}_{jz}(\mathbf{r}, \tau), \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где $\sum_{j=1}^p \mathbf{x}_{jx}(\mathbf{r}, \tau)$, $\sum_{j=1}^p \mathbf{x}_{jy}(\mathbf{r}, \tau)$, $\sum_{j=1}^p \mathbf{x}_{jz}(\mathbf{r}, \tau)$ – векторные суммы p ин-

формативных компонентов координатных составляющих величины $\mathbf{X}$.

Третье положение концепции обусловлено относительностью перемещения. В зависимости от положения базовой системы координат и выбранной точки контролируемого объекта информативные компоненты в моделях (1), (2) могут быть выражены по-разному. Однако это не влияет на достоверность и воспроизводимость моделей при переходе от одной базовой системы координат к другой. То есть переход от одной модели к другой однозначен путем пересчета с использованием соответствующей однородной матрицы перехода [5].

Неоднозначность и многовариантность моделей обуславливается еще одним существенным обстоятельством.

Анализ практических задач, различающихся сложностью контролируемых объектов и траекторий их перемещения в реальном трехмерном пространстве, позволил структурировать область моделирования:

- формированием моделей составляющих сложных перемещений, которые претерпевают простые объекты;
- формированием моделей составляющих простых перемещений, которые претерпевают сложные объекты;
- формированием моделей сложных перемещений, которые претерпевают сложные объекты.

Еще одним примером сложного объекта, который претерпевает сложные многокомпонентные перемещения, является манипулятор универсального промышленного робота. Решения прямой и обратной кинематических задач манипулятора, основанное на применении однородных матриц преобразования, которые включают в себя матрицы поворота и сдвига звеньев, позволяет выделить информативные компоненты результирующих перемещений фланца последнего звена манипулятора [5].

Очевидно, что представленные моделями (1) и (2) многокомпонентные перемещения описывают перемещение некоторой точки объекта относительно базовой системы координат, которая может принадлежать и сложному, и простому объекту. Поэтому данные модели применимы во всех перечисленных случаях.

Прежде чем перейти к решению следующих задач, необходимо уточнить терминологию. Отметим, что используемое во многих рабо-

тах [6] понятие многомерного перемещения, отражающего движение объекта в трехмерном пространстве, не является эквивалентным или идентичным понятию многокомпонентного перемещения, о котором идет речь в настоящей работе. Многокомпонентное перемещение, отвечающее положениям сформулированной концепции, может быть и одномерным, что отражено в проекциях информативных составляющих на координатные оси декартовой системы координат моделей (1) и (2), и многомерным.

С учетом изложенного пространство моделирования многокомпонентных перемещений простых объектов представлено на рис. 1.

В соответствии с принятыми классификационными признаками представленная ниже модель является одномерной:

$$X_i(\mathbf{r}, \tau) = \sum_{j=1}^p \varsigma_{ij} \eta_{ij} x_{ij}(\mathbf{r}, \tau), \quad (3)$$

где $\varsigma_{ij} \in \{0, 1, -1\}$, $\eta_{ij} \in [0, 1]$ – комбинационные коэффициенты, вводимые в модель в соответствие с формальным аппаратом генерирования названных моделей [7].

Интерес представляет случай, когда из (3) тем или иным способом могут быть определены составляющие ее информативные компоненты $x_{ij}(\mathbf{r}, \tau)$. Обобщенная структура такой системы показана на рисунке 2.

Здесь $F_i(\dots)$ функция связи информативных компонентов $x_{ij}(\mathbf{r}, \tau)$ в многокомпонентной физической величине $X_i(\mathbf{r}, \tau)$, поступающей на вход структуры в интегральной векторной сумме, которая может быть описана моделью многокомпонентной физической величины вида (3) или иной подобной. $F_i^{-1}(\dots)$ – обратная функция, обеспечивающая переход от $X_i(\mathbf{r}, \tau)$ к $x_{ij}(\mathbf{r}, \tau)$.

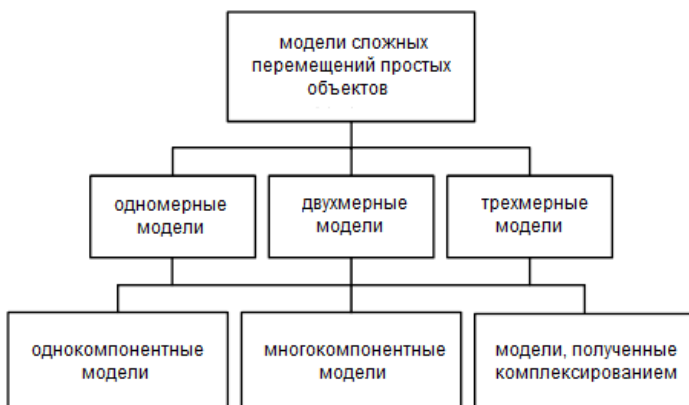


Рис. 1. Классификация математических моделей многокомпонентных перемещений подвижных объектов

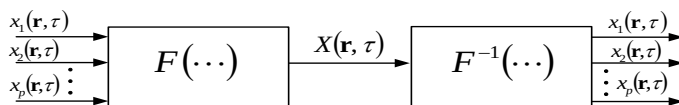


Рис. 2. Структуры системы на основе одномерной модели

В общем случае одноканальная структура (см. рисунок 2), построенная на основе модели (3), не позволяет осуществить переход от $X_i(\mathbf{r}, \tau)$ к $x_{ij}(\mathbf{r}, \tau)$. Выход из создавшегося положения лежит в сфере комплексирования моделей, представляющего собой метод формирования множества моделей, необходимых и достаточных для определения на их основе всех информативных компонентов $x_{ij}(\mathbf{r}, \tau)$. Поэтому определение пространства существования таких моделей является важной предпосылкой для решения упомянутой проблемы.

Библиографический список

1. РМГ 29-2013. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2014. – 56 с.
2. Нестеров В.Н. Теоретические основы измерений составляющих векторных многокомпонентных физических величин // Труды III международной конференции «Идентификация систем и задачи

управления». – М.: ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН, 2004. – С.1691–1700. ISBN 5-201-14996-9.

3. Нестеров В.Н. Концепция векторных многокомпонентных физических величин и ее применение // IV международная конференция и молодежная школа «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ-2018): Сборник трудов ИТНТ-2018. – Самара: Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, 2018. – С.1822-1832.

4. Nesterov V.N. Mathematical modeling of complex multi-component movements and optical method of measurement. *CEUR Workshop Proceedings*, 2016; 1638: 642-649. DOI: 10.18287/1613-0073-2016-1638-642-649.

5. Фу К., Гонсалес Р., Ли К. Робототехника: Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 624 с.

6. Методы и средства измерений многомерных перемещений элементов конструкций силовых установок / Под ред. Секисова Ю.Н., Скобелева О.П. – Самара: Самарский научный центр РАН, 2001. – 188 с.

7. Nesterov V.N., Zhmurov D.B. Formal synthesis of a data-acquisition system for multicomponent physical quantities // *Measurement Techniques*. – 2007. – Vol. 50. – № 9. – Pp. 903–907. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11018-007-0170-8>.

Сведения об авторах

Нестеров Владимир Николаевич, доктор технических наук, профессор, начальник НТЦ АО «Самарский электромеханический завод» (Самара), заведующий научно-исследовательской лабораторией кафедры теоретических основ радиотехники и связи Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики (Самара), профессор кафедры конструирования и технологии электронных систем и устройств Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева (Самара). E-mail: nesterov.ntc@gmail.com.

Павлов О.Ю., Зинатуллин С.О.

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ ДЛЯ ПРИЛОЖЕНИЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ

Статья посвящена исследованию возможностей нечёткой логики для прогнозирования бюджета работы предприятия в зависимости от изменяющихся параметров. С этой целью разрабатывается программный комплекс для получения данных для последующего моделирования на основе нечёткой логики.

Ключевые слова: анализ и синтез, принципы нечеткой логики, информационная система, разработка положения.

Pavlov O.Yu., Zinatullin S.O.

SPECIFIC FEATURES OF FUZZY LOGIC APPLICATION FOR PARAMETER FORECASTING APPLICATION

The article is devoted to the study of the possibilities of fuzzy logic for predicting the budget of the enterprise, depending on the changing parameters. For this purpose, a software package is being developed to obtain data for subsequent modeling based on fuzzy logic.

Keywords: analysis and synthesis, principles of fuzzy logic, information system, position development.

Информационные технологии и инновации играют ключевую роль в развитии социально-экономической сферы, поэтому актуальность «умных» приложений растет с каждым годом. Такие приложения включают не только основную информацию об изучаемом объекте и рабочий функционал системы, а также анализ и прогнозирование.

Целью работы является изучение и применение новых алгоритмов нечеткой логики для создания приложения для прогнозирования бюджета компании.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

- изучить область применения нечётких систем;
- проанализировать элементы нечеткой логики;
- изучить логические операции для нечетких множеств;
- рассмотреть алгоритм применения нечеткой логики;

- разработать прототип программы и реализовать тестовый экземпляр [4, 6, 9].

Нечеткая логика составляет основу теории нечетких множеств, в которой функция является не бинарной, как в классических логиках, – да или нет, а может принимать любое значение в числовом диапазоне – от 0 до 1.

Благодаря нечеткой логике нашли свое применение: системы управления базами данных и экспертные системы нового поколения. Использование базы данных позволяет хранить, обрабатывать и анализировать нечеткую или неструктурированную информацию организаций, компаний или их отделов.

Автоматизированные информационные системы, в основе которых лежит использование нечеткой логики успешно эксплуатируются в различных областях сферы экономики и общества в целом [1, 2, 3].

В основе нечеткой логики находится теория нечетких множеств, результатами вычисления функции которых являются бесконечное количество, но ограничено диапазоном от 0 до 1.

К нечетким множествам относят следующие логические операции:

- объединение;
- пересечение;
- разность;
- симметрическая разность множеств;
- декартово произведение множеств;
- декартова степень множества.

Для примера даны нечеткие множества A и B.

- объединение нечетких множеств: $AB(x) = \min(F(x), B(x))$;

- пересечение нечетких множеств: $AB(x) = \max(F(x), B(x))$.

Программный пример разрабатывался на языке программирования C# и демонстрирует применение нечеткой логики при выполнении импликации методом Мамдани, Сугено и Ларсена.

Скриншот загрузки программы представлен на рисунке 1 [4, 5, 7, 8].

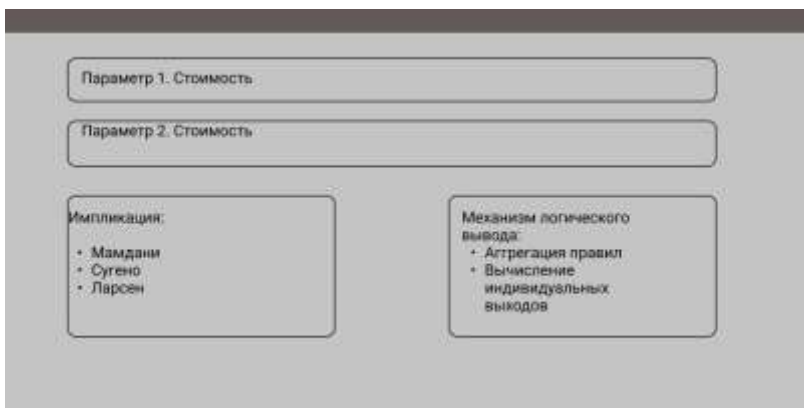


Рис. 1. Главное окно приложения

В данном примере программы выполняются следующие действия:

- а) выбор стоимостной оценки параметра 1;
- б) выбор типа импликации;
- в) выбор логического вывода данных.

Выполнив все действия, программа выдаст результат, который просчитан по внутреннему коду формулы и неявному объявлению изначальных данных.

Пример кода программы:

```
public class FSet
{
    // fuzzy set name
    private string name;
    // membership functions of the fuzzy set
    private IMFunction function;
    /// <summary>
    /// Name of the fuzzy set.
    /// </summary>
    public string Name
    {
        get { return name; }
    }
}
```



Рис. 2. Пример прогнозирования

Таким образом, в ходе изучения работы программы на основе нечеткой логики были получены данные для анализа и прогнозирования результатов работы компании и формирования ее бюджета на основе нескольких параметров.

Библиографический список

1. Аверкин А.Н., Батыршин И.З., Блишун А.Ф., Силов В.Б., Тарасов В.Б. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / Под ред. Д.А. Поспелова. – М.: Наука, 1986. – 312 с.
2. Дегтярев Г.Л., Сагдатуллин А.М. Разработка системы нейро-нечеткого прогнозирования концентрации содержащихся примесей при транспортировке нефтяной эмульсии со скважин // Математические методы в технологиях и технике. 2021. № 2. С. 110-113.
3. Дегтярев Г.Л., Сагдатуллин А.М. Разработка математических моделей прогнозирования процессов добычи и транспорта нефти в условиях неопределенности // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). 2020. № 54. С. 71-75.
4. Колесников А. П. Методы численного анализа, изложенные на языке формул и алгоритмическом языке C++; Высшая школа. – Москва, 2017. – 414 с.
5. Сагдатуллин А.М. Применение методов нечеткой логики и нейронных сетей для автоматизации технологических процессов в нефтегазовом машиностроении и повышения эффективности добычи

нефти // Интеллектуальные системы в производстве. 2021. Т. 19. № 2. С. 83-89.

6. Рихтер Джеффри CLR via C#. Программирование на платформе Microsoft.NET Framework 4.5 на языке C#; Питер - М., 2016. – 896 с.

7. Сагдатуллин А.М., Шамсутдинов Р.А. Разработка алгоритма улучшения качества изображений входного видеопотока для управления атомными транспортными средствами // Интеллектуальные системы в производстве. 2021. Т. 19. № 2. С. 90-95.

8. Яхьяева Г.Э. Нечеткие множества и нейронные сети: учеб. пособие Москва: Интернет Университет Информационных технологий; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. – 316 с.

9. Zadeh, L.A. (2013). Fuzzy logic. In Computational Complexity: Theory, Techniques, and Applications (Vol. 9781461418009, pp. 1177–1200). Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-1800-9_73.

Сведения об авторах

Павлов Олег Юрьевич.

Зинатуллин Станислав Олегович, saturn-s5@mail.ru.

УДК 517.9

Расулов М.С., Норов А.К.

ЗАДАЧА СО СВОБОДНОЙ ГРАНИЦЕЙ ДЛЯ ДИФFUЗНОЙ МОДЕЛИ ЛОТКИ-ВОЛЬТЕРРА

В данной работе исследуется задача для системы квазилинейных параболических уравнений с двумя различными свободными границами. Для решения задачи установлены априорные оценки. На основе априорных оценок доказана существование и единственность решений.

Ключевые слова: свободные границы, система квазилинейных параболических уравнений, априорные оценки, существование и единственность решений.

Rasulov M.S. Norov A.K.

**A FREE BOUNDARY PROBLEM FOR A DIFFUSE
LOTKA-VOLTERRA MODEL**

This work investigates problem for the system of quasilinear parabolic equations with two different free boundaries. For the solutions of the problem apriori estimates are established. On the base of apriori estimations the existence and uniqueness of theorems are proved.

Keywords: free boundaries, a system of quasilinear equations, a priori bounds, existence and uniqueness of solutions.

В настоящей заметке мы изучаем квазилинейной параболической системы с двумя свободными границами, в которой две свободные границы используются для описания фронтов распространения двух конкурирующих видов, соответственно. Взаимодействие между двумя конкурирующими видами формулируется как следующая задача со свободной границей:

$$k_1(u)u_t - d_1u_{xx} - m_1u_x = u(a_1 - b_1u - c_1v), \quad (t, x) \in D, \quad (1)$$

$$k_2(v)v_t - d_2v_{xx} - m_2v_x = v(a_2 - b_2u - c_2v), \quad (t, x) \in Q, \quad (2)$$

$$u(0, x) = u_0(x), \quad 0 \leq x \leq s_0, \quad (3)$$

$$v(0, x) = v_0(x), \quad 0 \leq x \leq h_0, \quad (4)$$

$$u_x(t, 0) = 0, \quad v_x(t, 0) = 0, \quad 0 \leq t \leq T, \quad (5)$$

$$u(t, s(t)) = 0, \quad v(t, h(t)) = 0, \quad 0 \leq t \leq T, \quad (6)$$

$$s'(t) = -\mu_1 u_x(t, s(t)), \quad 0 \leq t \leq T, \quad (7)$$

$$h'(t) = -\mu_2 v_x(t, h(t)), \quad 0 \leq t \leq T, \quad (8)$$

$$s(0) = s_0, \quad h(0) = h_0, \quad s_0 < h_0; \quad u(t, x) \equiv 0, \quad s(t) \leq x \leq h(t), \quad (9)$$

где $D = \{(t, x) : 0 < t \leq T, 0 < x < s(t)\}$,

$Q = \{(t, x) : 0 < t \leq T, 0 < x < h(t)\}$; $u(t, x)$, $v(t, x)$ – плотности популяции в момент времени t в точке x ; $s(t)$, $h(t)$ – свободные границы и определяются вместе с функциями $u(t, x)$, $v(t, x)$; d_i – коэффициент диффузии, a_i – коэффициенты удельной скорости роста популяций, $i = 1, 2$; c_1 и b_2 – коэффициенты межвидовой конкуренции, c_2 и

b_1 – коэффициенты внутривидовой конкуренции, а параметры μ_i соответственно представляют скорость распространения в новые области для $u(t, x)$ и $v(t, x)$.

Задача (1)-(9) исследована в работе [4] при $k_i(\cdot) \equiv 1$, $m_i \equiv 0$, $i = 1, 2$.

Относительно данных задачи предполагаются выполненными следующие условия:

(I) функции $k_i(\cdot)$ и $k'_i(\cdot)$ определены для любого значения аргумента и ограничены на замкнутом множестве аргумента, причем $k_i(\cdot) \geq k_{i0} > 0$;

(II) d_i , m_i , a_i , b_i , c_i , μ_i – положительные постоянные, $i = 1, 2$;

(III) $u_0(x), v_0(x) \in C^2[0, s_0]$,

$$0 < u_0(x) \leq \frac{a_1}{b_1} \text{ в } (0, s_0); \quad 0 < v_0(x) \leq \frac{a_2}{c_2} \text{ в } (0, h_0),$$

$$u_0(0) = v_0(0) = 0, \quad u_0(s_0) = v_0(h_0) = 0, \quad u'_0(s_0) < 0, \quad v'_0(h_0) < 0;$$

$$(IV) \quad \lim_{x \rightarrow s_0} \frac{u_0(x)}{s_0 - x} = 0, \quad \lim_{x \rightarrow h_0} \frac{v_0(x)}{h_0 - x} = 0.$$

Априорные оценки. Установим некоторые априорные оценки шаудеровского типа, которые будут использованы при доказательстве глобальной разрешимости задачи (1)-(9) в классе $C^{2+\alpha}$ ([1, 2]).

Теорема 1. Пусть функции $s(t)$, $h(t)$, $u(t, x)$, $v(t, x)$ являются решением задачи (1)-(9). Тогда существуют положительные постоянные $M_i, i = 1, 4$, не зависящие от T , для которых справедливы оценки

$$0 < u(t, x) \leq M_1, \quad (t, x) \in \bar{D}, \quad (10)$$

$$0 < v(t, x) \leq M_2, \quad (t, x) \in \bar{Q}, \quad (11)$$

$$0 < s'(t) \leq M_3, \quad 0 \leq t \leq T, \quad (12)$$

$$0 < h'(t) \leq M_4, \quad 0 \leq t \leq T. \quad (13)$$

где $N_1 \geq \max \left\{ \frac{a_1^2}{b_1 m_1}, \max_x \left| \frac{u_0(x)}{s_0 - x} \right| \right\}$, $N_2 \geq \max \left\{ \frac{a_2^2}{c_2 m_2}, \max_x \left| \frac{v_0(x)}{h_0 - x} \right| \right\}$

Чтобы получить априорные оценки используя методов работы [1] выпрямляем свободные границы и в фиксированных областях получим эквивалентные задачи к задаче (1)-(9):

$$U_t = A_1(t, y, s, U)U_{yy} + B_1(t, y, s, U, U_y), (t, y) \in D_1, \quad (14)$$

$$U(0, y) = U_0(y), \quad 0 \leq y \leq s_0, \quad (15)$$

$$U_x(t, 0) = 0, \quad 0 \leq t \leq T, \quad (16)$$

$$U(t, 1) = 0, \quad 0 \leq t \leq T, \quad (17)$$

и

$$V_t = A_2(t, y, s, V)V_{yy} + B_2(t, y, s, V, V_y), (t, y) \in Q_1, \quad (18)$$

$$V(0, y) = V_0(y), \quad 0 \leq y \leq h_0, \quad (19)$$

$$V_x(t, 0) = 0, \quad 0 \leq t \leq T, \quad (20)$$

$$V(t, 1) = 0, \quad 0 \leq t \leq T, \quad (21)$$

где $D_1 = \{(t, y) : 0 < t \leq T, 0 < y < 1\}$, $Q_1 = \{(t, y) : 0 < t \leq T, 0 < y < 1\}$,

$$s'(t) = -\frac{\mu_1}{s(t)}U_y(t, 1), \quad h'(t) = -\frac{\mu_2}{h(t)}V_y(t, 1), \quad A_1 = \frac{1}{k_1(U)}\frac{d_1}{s^2(t)},$$

$$A_2 = \frac{1}{k_2(V)}\frac{d_2}{h(t)}, \quad B_1(U, V, U_y) = \frac{U(a_1 - b_1U - c_1V)}{k_1(U)} + \frac{ys'(t) + m_1}{s(t)k_1(U)}U_y,$$

$$B_2(U, V, U_y) = \frac{V(a_2 - b_2U - c_2V)}{k_2(V)} + \frac{yh'(t) + m_2}{h(t)}V_y.$$

Теорема 2. Пусть функция $v(t, y)$ непрерывна в $\bar{Q}$ вместе с v_y и удовлетворяет условиям задачи (14)-(17). Тогда

$$|v_y(t, y)| \leq M_4(M_1, M_2, M_3, A_0, \delta), (t, y) \in Q^\delta. \quad (22)$$

Если $v|_{\Gamma(t=0, y=\pm s_0)} \equiv 0$, то для $(t, y) \in \bar{Q}$

$$|U_y(t, y)| \leq M_5(M_1, M_2, M_3, A_{10}). \quad (23)$$

где $D_1^\delta = \{(t, y) : 0 < \delta \leq t \leq T, \delta \leq y \leq 1 - \delta\}$, $A_{01} = \min_{\bar{D}_1} A_1$,

$\Gamma(t=0, y=0, y=1)$ – параболическая граница.

Теорема 3. Пусть непрерывная в $\bar{D}_1$ функция $v(t, y)$ удовлетворяет условиям задачи (14)-(17). Предположим, что ограниченные функции $A_1(t, y, s(t), U)$, $B_1(t, y, s(t), U, U_y)$ для $(t, y) \in \bar{D}_1$, $|U| \leq M_1$ и произвольных v_y удовлетворяют условиям

$$\frac{|B_1(t, y, s, U, U_y)|}{A_1(t, y, s, U)} \leq K_1(U_y^2 + 1), \quad K_1 > 0.$$

Кроме того, в области $\{(t, y) \in \bar{D}_1, |U| \leq M_1, |U_y| \leq M_5\}$ справедлива

$$|U|_{\frac{2}{3}}^{D^{2\delta}} \leq M_6(M_1, M_2, M_3, A_0, K_1, \delta) \quad (24)$$

Пусть $v(t, y)$ обладает обобщенными производными $v_{ty}, v_{yy} \in L_2(Q)$, то

$$|U|_{1+\gamma}^{Q^{2\delta}} \leq M_7(M_1, M_2, M_3, K_1, \delta), \quad 0 < \gamma < 1, \quad (25)$$

Если $U|_{\Gamma(t=0, y=0, y=1)} = 0$, то оценки (24)-(25) справедливы и в $\bar{D}_1$.

Оценки старших производных в $\bar{D}_1$ устанавливаются при помощи результатов для линейных уравнений [2].

Рассуждая так же, как и выше используя методов работы [1,2], установим оценки для $|V_y|$, $|V|_{1+\gamma}$, $|V|_{2+\gamma}$ в Q_1 .

Теорема 4 (Единственность решения). Пусть выполнены условия теоремы 3. Тогда решение задачи (1)-(9) единственно.

Теорема 5 (Существование решения). Пусть выполнены условия теоремы 3. Тогда существует решения $u(t, x) \in C^{2+\gamma}(\bar{D})$, $v(t, x) \in C^{2+\gamma}(\bar{Q})$, $s(t) \in C^{1+\gamma}([0, T])$, $h(t) \in C^{1+\gamma}([0, T])$ задачи (1)-(9).

Библиографический список

1. Кружков С.Н. Нелинейные параболические уравнения с двумя независимыми переменными // Труды Моск. Матем. общва, 1967, т.16. С. 329-346.

2. Ладыженская О.А., Солонников В.А., Уралцева Н. Н. Линейные и квазилинейные уравнения параболического типа. М.: Наука, 1967.

3. Takhirov J.O. A free boundary problem for a reaction-diffusion equation appearing in biology // Indian J. Pure Appl. Math., 2019, 50(1): pp.95-112.

4. Wu C.-H. The minimal habitat size for spreading in a weak competition system with two free boundaries // J.Differential Equation.2015. Vol.259. pp.873-897.

Сведения об авторах

Расулов Мирожиддин Собиржонович, старший научный сотрудник, Институт Математики АН РУз (Ташкент). E-mail: rasulov@mathinst.uz.

Норов Абдурахмон Каюмович, аспирант, Институт Математики АН РУз (Ташкент). E-mail: norov@mathinst.uz.

УДК 004.6

Фёдоров Ю.И.

НЕПРЕРЫВНАЯ МОДЕЛЬ ЗАГРУЗКИ ДАННЫХ В ЛОКАЛЬНУЮ БАЗУ ДАННЫХ УДАЛЁННОГО КОМПЬЮТЕРА

В статье обсуждается математическая модель одной из типичных задач из области информационных технологий о загрузке данных в локальную базу данных, которая используется приложением, исполняемым на удалённом компьютере.

Ключевые слова: математическая модель, информационные технологии, загрузка данных в локальную базу данных.

Fedorov Y.I.

CONTINUOUS MODEL OF LOADING DATA INTO THE LOCAL DATABASE OF A REMOTE COMPUTER

The article discusses a mathematical model of one of the typical problems in the field of information technology about loading data into a local database that is used by an application running on a remote computer.

Keywords: mathematical model, information technologies, loading data into a local database.

В статьях [2]-[5] автором данной работы предложен аналитический математический метод оценки параметров экспоненциальных математических моделей некоторых процессов. В статьях [2], [3] найдены априорные оценки интенсивности отказов программного обеспечения (ПО) при тестировании в экспоненциальной математической модели надёжности, а в [4], [5] – оценки опасных факторов в интегральной математической модели пожара в помещениях зданий в начальной стадии. Несмотря на различие в природе указанных процессов (явлений), предложенный математический метод оказался эффективным при оценке динамики параметров математических моделей этих процессов.

В данной статье формулируется математическая модель одной из типичных задач из области информационных технологий, связанная с загрузкой данных в локальную базу данных, в форме, позволяющей в дальнейшем применить указанный математический метод оценок параметров процесса.

На удалённом компьютере выполняется некоторое приложение, использующее данные локальной базы данных (БД) [1]. К этой категории информационных систем (ИС) относится кассовое программное обеспечение (ПО) магазинов и офисов продаж, ПО МФЦ, справочно-информационных и других систем массового обслуживания. Для обеспечения необходимой скорости обслуживания и безотказной работы систем используют локальные БД, размещённые непосредственно в местах обслуживания (у пользователей). Со временем данные из локальной БД теряют актуальность, поэтому их необходимо регулярно обновлять. Для обновления данных локальной БД производятся сеансы загрузки актуальных значений из внешних систем (централизованного источника) [1]. При этом ПО не только получает данные для обновления из централизованного источника, но и передаёт данные внешним системам. Объём передаваемых данных обычно является большим. Актуальной является проблема разработки достаточно простых методов оценки способности приложений (ПО ИС) успевать обновлять поступающие данные (при интенсивности потока данных в некоторых заданных пределах).

Сформулируем математическую модель, описывающую загрузку данных в локальную БД (обмен данными) в такой информационной

системе [1]. Исследование этой модели позволит сделать некоторые выводы о поведении рассматриваемой информационной системы. Примем следующие допущения.

1) Дискретные параметры, характеризующие процесс обмена данными в рассматриваемой информационной системе, заменим непрерывными величинами, описывающими состояние обмена в ИС.

2) Типичный алгоритм загрузки данных (обмена данными) состоит в следующем. Через заданные промежутки времени $z_0 \geq 0$ происходит запрос ИС о наличии имеющихся новых данных для загрузки. Если новые данные обнаружены, то производится инициализация системы обновления данных: все имеющиеся на данный момент времени данные загружаются в локальную БД. Затем выполняются технологические операции по завершению сеанса обмена данными в ИС (деинициализация обмена) [1].

3) Скорость загрузки новых данных в локальную БД пропорциональна средней скорости загрузки блока данных в течение одного сеанса загрузки.

4) Скорость загрузки новых данных в локальную БД уменьшается на величину, пропорциональную объёму загружаемых данных вследствие обратного обмена данными удалённого компьютера с внешними системами. 5) В информационной системе присутствует внешнее управление загрузкой данных, математически выражающееся в наличии в модели управляющей функции.

Производим формализацию задачи обмена данными в рассматриваемой информационной системе [1]. Пусть $t \geq 0$ (сек) – время начала сеанса загрузки данных (обнаружения новых данных); $x(t) \geq 0$ (в условных единицах) – объём данных подлежащих загрузке в локальную БД из внешних систем, обнаруженных к моменту времени t . Обозначим через $z_1 > 0$ суммарное время по инициализации и деинициализации обмена данными, а через $z_2 > 0$ – время, необходимое для загрузки одной единицы объёма данных в локальную БД. Дискретные параметры z_1 и z_2 зависят от текущей загруженности ИС, т. е. от времени t : $z_1 = z_1(t)$ и $z_2(t)$. Следуя пункту 1 Допущений, дискретные параметры t , $x(t)$, $z_1 = z_1(t)$, $z_2(t)$ заменим непрерывным аргументом t и непрерывными функциями $x(t)$, $z_1 = z_1(t)$, $z_2(t)$ соответственно. Исходя из пункта 2 Допущений, вы-

числим длительность $z(t)$ одного сеанса загрузки блока данных объёма $x(t)$ в локальную БД, обнаруженных к моменту времени t ,

$$z(t) = z_2 x(t) + z_1(t) + z_0. \quad (1)$$

Зная длительность одного сеанса загрузки (1), найдём среднюю скорость загрузки $\bar{v}(t)$ блока данных объёмом $x(t)$ в течение одного сеанса загрузки

$$\bar{v}(t) = \frac{x(t)}{z(t)} \equiv \frac{x(t)}{z_2(t)x(t) + z_1(t) + z_0}. \quad (2)$$

В соответствие с пунктами 3-5 Допущений и формулой (2) формулируем следующую математическую модель задачи загрузки новых данных в локальную БД (обмена данными) в рассматриваемой ИС: на промежутке $[0, +\infty)$ найти непрерывное решение $x(t)$ задачи Коши для обыкновенного дифференциального уравнения

$$x'(t) = - \frac{\alpha x(t)}{z_2(t)x(t) + z_1(t) + z_0} + \beta x(t) + f(t) \quad (3)$$

с начальным условием

$$x(0) = x_0. \quad (4)$$

В задаче (3)-(4) α и β , $\alpha, \beta > 0$, коэффициенты пропорциональности, не зависящие от времени t , $f(t)$ – заданная функция управления загрузкой данных. Выбор знака «минус» перед дробью в правой части формулы (3) обусловлен тем, что объём данных, подлежащих загрузке, уменьшается в процессе загрузки.

В результате проведённых в данной работе исследований построена уточнённая математическая модель одной из типичных задач из области информационных технологий о загрузке данных в локальную базу данных, которая используется приложением, исполняемым на удалённом компьютере.

Построенная модель позволит (в дальнейшем) найти оценки параметров изучаемого процесса.

Библиографический список

1. Пашуткин Д.В. Непрерывная модель загрузки данных [Электронный ресурс] // Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ: VIII Международная научная молодёжная школа-семинар имени Е.В. Воскресенского (Саранск, 16-20 июля 2018 г.). Саранск: СВМО, 2018. – С. 86-89. Режим доступа:

<http://conf.svm.ru/files/2018/papers/paper29.pdf>. – Дата обращения: 18.04.21.

2. Фёдоров Ю. И., Краснова О.В. Оценка количества оставшихся в программе ошибок после её тестирования в экспоненциальной математической модели надёжности программного обеспечения. В сборнике: Физика конденсированного состояния и смежные проблемы. Сборник трудов Междунар. науч. конф., посвященной 70-летию профессора А.И. Филиппова. К. Б. Сабитов. 2019. С. 194-199.

3. Краснова О.В., Фёдоров Ю. И., Боровский А.С. Расчёт оценки количества обнаруженных и исправленных в программе ошибок после её тестирования в экспоненциальной математической модели надёжности программного обеспечения. В сборнике: Компьютерная интеграция производства и ИПИ-технологии. Сборник материалов IX Всерос. конф. с междунар. участием. 2019. С. 444-447.

4. Федоров Ю.И., Павлидис В.Д., Урбан В.А., Яковлева Е.В. Оценка относительного приращения (перепада) температуры газовой среды в интегральной математической модели пожара в зданиях в начальной стадии // Безопасность в техносфере, 2020, т. 9, № 3. – С. 33-40.

5. Фёдоров Ю.И., Павлидис В.Д. Оценка приращения (падения) среднеобъёмной плотности кислорода в помещениях зданий в интегральной математической модели пожара в начальной стадии // Научно-технический вестник Поволжья, 2021, № 3. – С. 76-79.

Сведения об авторах

Фёдоров Юрий Иванович, кандидат физико-математических наук, доцент Оренбургского государственного аграрного университета (Оренбург). E-mail: yurf0023@mail.ru.

Хусаинов И.Г. Хусаинова Г.Я.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОПРЕССОВКИ СФЕРИЧЕСКОЙ ПОЛОСТИ

Решена задача опрессовки сферической полости, окруженной насыщенной жидкостью пористой средой. Построена математическая модель процесса и получено нелинейное интегральное уравнение, которое описывает изменение давления в полости. Выполнено исследование зависимости изменения давления от параметров среды.

Ключевые слова: давление, пористая среда, модель, уравнение, опрессовка, полость.

Khusainov I.G., Khusainova G.Y.

MATHEMATICAL MODELING OF THE PROCESS OF CRIMPING A SPHERICAL CAVITY

The problem of pressing a spherical cavity surrounded by a porous medium saturated with liquid is solved. A mathematical model of the process is constructed and a nonlinear integral equation is obtained, which describes the pressure change in the cavity. The dependence of pressure change on the environment parameters was investigated.

Keywords: pressure, porous medium, model, equation, pressure testing, cavity.

Исследование коллекторских характеристик призабойной зоны пласта имеет важное значение для эксплуатации газовых и нефтяных скважин [1-4]. Опрессовка полости, окруженной пористой средой, позволяет оценить коллекторские характеристики пористой среды [5-7].

В работе решена задача опрессовки сферической полости, окруженной насыщенной жидкостью проницаемой пористой средой. Найдено и численным методом исследовано нелинейное интегральное уравнение, которое описывает изменение давления в полости в зависимости от коллекторских характеристик пористой среды.

В исходном состоянии $t < 0$ давление жидкости в пористой среде постоянно и равно p'_0 . Полость частично заполнена газом и частично жидкостью. В начальный момент времени ($t = 0$) давление внутри

полости мгновенно увеличивается до значения p_0 . После этого, за счет фильтрации жидкости в окружающую среду, начинается релаксация давления в полости. По темпу релаксации давления можно оценить коллекторские параметры пористой среды.

Будем считать, что газ находится в контейнере, который исключает его фильтрацию в окружающую пористую среду.

Математическая модель задачи. Закон сохранения массы жидкости внутри полости запишем в виде:

$$\frac{d\rho}{dt} = -\frac{3}{a} \rho_l v|_{r=a}, \quad (1)$$

где $\rho = \rho_l(1 - \alpha_g)$, ρ_l – плотность жидкости, α_g – объёмная доля газовой фазы в полости, a – радиус сферической полости, v – скорость фильтрации жидкости через стенки полости.

Скорость фильтрации жидкости вокруг полости определяем используя закон Дарси [8, 9]:

$$v' = -\frac{k}{\mu_l} \frac{\partial p'}{\partial r}.$$

Здесь p' , v' – давление и скорость фильтрации жидкости, μ_l – вязкость жидкости, k – коэффициент проницаемости среды. На границе $r = a$ выполняется условие неразрывности среды

$$v' = v.$$

Изменение давления вокруг сферической полости описывается с помощью уравнения пьезопроводности:

$$\frac{\partial p'}{\partial t} = \chi_l \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial p'}{\partial r} \right), \quad a < r < \infty, \quad (2)$$

где параметр $\chi_l = \frac{k\rho_{l0}C_l^2}{m\mu_l}$, m – коэффициент пористости, ρ_{l0} – начальная плотность жидкости, C_l – скорость звука в жидкости.

Запишем начальное условие для давления:

$$p' = p'_0, \quad t = 0, \quad a < r.$$

Граничные условия для уравнения (2) имеют вид:

$$p' = p(t), \quad t > 0, \quad r = a, \quad p' = p'_0, \quad t > 0, \quad r \rightarrow \infty.$$

Жидкость внутри и вокруг полости описывается уравнением состояния:

$$p = p_0 + C_l^2(\rho_l - \rho_{l0}). \quad (3)$$

Здесь p_0 – начальное давления в полости.

Уравнение состояния для газовой фазы имеет вид:

$$\alpha_g = \alpha_{g0} (p_0/p)^{1/\gamma}. \quad (4)$$

Здесь γ – показатель политропы, α_{g0} – начальное значение объемной доли газа в полости.

Так как $\rho_l - \rho_{l0} \ll \rho_l$, то интегрируя уравнение (1) по времени от начального значения 0 до некоторого t , получим:

$$\rho_l(1 - \alpha_g) - \rho_{l0}(1 - \alpha_{g0}) = -\frac{3}{a} \rho_{l0} \int_0^t v|_{r=a} dt'.$$

Используя величины ρ_l и α_g соответственно из формул (3) и (4), из последнего уравнения получим следующее интегральное уравнение:

$$\alpha_{g0} \left(\left(\frac{p_0}{p} \right)^{1/\gamma} - 1 \right) - \frac{p - p_0}{\rho_{l0} C_l^2} \left(1 - \alpha_{g0} \left(\frac{p_0}{p} \right)^{1/\gamma} \right) = -\frac{3}{a} \frac{k}{\mu_l} \int_0^t \frac{\partial p'}{\partial r} \Big|_{r=a} dt'. \quad (5)$$

В правую часть последнего уравнения подставляем решение уравнения пьезопроводности

$$p' - p'_0 = \int_0^t \frac{\partial U(r, t - t')}{\partial t} (p(t') - p'_0) dt', \quad U(r, t) = \frac{a}{r} \Phi \left(\frac{r - a}{2\sqrt{\chi_l t}} \right).$$

После некоторых преобразований из (5) получаем нелинейное интегральное уравнение, которое описывает изменение давления в сферической полости после опрессовки:

$$\alpha_{g0} \left(\left(\frac{p_0}{p} \right)^{1/\gamma} - 1 \right) - \frac{p - p_0}{\rho_{l0} C_l^2} \left(1 - \alpha_{g0} \left(\frac{p_0}{p} \right)^{1/\gamma} \right) = \int_0^t \varphi \left(\frac{t - t'}{t_{al}} \right) (p(t') - p'_0) dt'. \quad (6)$$

Здесь функция $\varphi(S)$ определяется по формуле $\varphi(S) = \frac{3k}{a^2 \mu_l} \left(\frac{1}{\sqrt{\pi S}} + 1 \right)$.

Когда выполняется условие $\Delta p_0 = p_0 - p'_0 \ll p_0$, линеаризуя уравнение (6), получим:

$$1 - \Delta P = \frac{3}{\beta t_{al}} \int_0^t \left(1 + \frac{1}{\sqrt{\pi(t-t')/t_{al}}} \right) \Delta P(t') dt'. \quad (7)$$

В последнем уравнении безразмерные величины ΔP и $\Delta P'$ определяются по формулам $\Delta P = \Delta p / \Delta p_0$, $\Delta P' = \Delta p' / \Delta p_0$, $\Delta p = p - p'_0$, $\Delta p_0 = p_0 - p'_0$, $\Delta p' = p' - p'_0$, $\alpha_c = p_0 / \rho_{l0} C_l^2$.

В работе найдено точное аналитическое решение уравнения (7):

$$\Delta P = \frac{1}{\beta_+ - \beta_-} \left[\beta_+ \exp(\beta_+^2 \tau) \Phi(\beta_+ \sqrt{\tau}) - \beta_- \exp(\beta_-^2 \tau) \Phi(\beta_- \sqrt{\tau}) \right], \quad (8)$$

$$\tau = \frac{t}{\beta^2 t_{al}}, \quad \beta_- = \frac{3}{2} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{4}{3} \beta} \right), \quad \beta_+ = \frac{3}{2} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{4}{3} \beta} \right).$$

Последнее решение использовалось для тестирования численного метода решения нелинейного интегрального уравнения (6). Для этого численным методом были решены уравнения (6) и (7). После построения и сравнения графиков численных решений уравнений (6) и (7) и точного аналитического решения (8) было установлено, что численное решение уравнения (7) и аналитическое решение (8) практически совпадают. Если шаг по времени равен 0.001 с, то погрешность численного решения равна 0.01%. Таким образом, используемый в работе численный метод достаточно точно решает интегральное уравнение.

В работе, используя численное решение нелинейного интегрального уравнения (6), выполнено исследование зависимости колебания давления в сферической полости от коллекторских характеристик пористой среды.

Библиографический список

1. Володин С.В., Дмитриев В.Л., Хусаинов И.Г. Распространение линейных волн во влажных насыщенных газом пористых средах // Теплофизика высоких температур. 2009. Т. 47. № 5. – С. 734-740.
2. Хафизов Р.М., Хусаинов И.Г., Шагапов В.Ш. Динамика восстановления давления в «вакуумированной» скважине // Прикладная математика и механика. 2009. Т. 73. Вып. 4. – С. 615-621.
3. Хусаинов И.Г. Акустическое зондирование перфорированных скважин короткими волнами // Прикладная механика и техническая физика. 2013. № 1. – С. 86-93.

4. Хусаинов И.Г. Волны в заполненном жидкостью цилиндрическом канале: Монография. – Стерлитамак: Стерлитамакский филиал БашГУ, 2015. – 88 с.

5. Хусаинов И.Г. Исследование влияния круговой границы на процесс релаксации давления в скважине после её опрессовки // Автоматизация. Современные технологии. – 2017. – Т. 71. – № 11. – С. 490-494.

6. Хусаинов И.Г. Отражение акустических волн в цилиндрическом канале от перфорированного участка // Прикладная математика и механика. 2013. – Т. 77. – № 3. – С. 441-451.

7. Хусаинов И.Г. Релаксация температуры пластины, помещенной в среду с более низкой температурой // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. – 2017. – Т. 3. – № 4. – С. 132-141.

8. Хусаинов И.Г. Тепловые процессы при акустическом воздействии на насыщенную жидкостью пористую среду // Вестник Башкирского университета. – 2013. – Т. 18. – № 2. – С. 350-353.

9. Хусаинов И.Г., Хусаинова Г.Я. Исследование параметров пласта методом опрессовки // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 3. URL: <http://www.science-education.ru/117-13813> (дата обращения: 04.07.2014).

Сведения об авторах

Хусаинов Исмагильян Гарифьянович, доцент СФ БашГУ. E-mail: ivt30@mail.ru.

Хусаинова Гузалия Ядкарровна, кандидат физико-математических наук, доцент СФ БашГУ. E-mail: gkama@mail.ru.

УДК 532.54

Хусаинова Г.Я.

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ ФИЛЬТРАЦИИ АНОМАЛЬНОЙ ЖИДКОСТИ

Рассмотрена фильтрация аномальной жидкости при стационарном течении. Получено аналитическое решение для плоскопараллельного течения и проведен его анализ.

Ключевые слова: аномальная жидкость, фильтрация, поля температуры, поля давления.

Khusainova G.Y.

INVESTIGATION OF TEMPERATURE CHANGE AT ANOTHER LIQUID FILTRATION

The filtration of an abnormal liquid is considered at stationary current. The analytical decision for plainly-parallel current is received and the analysis is lead.

Keywords: an abnormal liquid, a filtration, fields of temperature, a field of pressure.

Введение. В условиях реальных пластовых систем установление поля давления происходит значительно быстрее, нежели температурного поля. И поэтому при изучении температурных процессов в некоторых случаях поле давления можно считать стационарным. Термодинамические процессы при течении жидкостей в пористой среде в нестационарном поле давления отличаются от стационарных рядом важных особенностей. Поэтому явление изменения температуры при фильтрации жидкостей в пористой среде называется баротермическим эффектом [1, 2].

Отметим так же, что установление температуры фильтрующийся жидкости сразу после включения стационарного профиля давления также относится к баротермическому эффекту и не совпадает с эффектом Джоуля-Томсона.

Величина эффекта Джоуля-Томсона не зависит от характеристик пористой среды, а определяется свойствами жидкости. Величина баротермического эффекта определяется коллекторскими свойствами пористой среды, изменяется со временем, зависит от распределения давления по пути движения жидкости.

Постановка задачи. В полубесконечном пласте, который заполнен нефтью, обладающей предельным градиентом сдвига, в начальный момент времени $t=0$ на границе пласта $x=x_0$ начинает работать закачивающая галерея. Предполагается равенство температур скелета и флюида в каждой точке, пористый скелет - несжимаемым и температурные изменения, обусловленные баротермическим эффектом, не изменяют гидродинамические характеристики пористой среды и насыщающей жидкости. Рассматривается случай однофазного течения.

Уравнение энергии имеет вид [3, 4]:

$$c_n \frac{\partial T}{\partial t} - c_{ж} m \eta \frac{\partial P}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \left| \frac{\partial P}{\partial x} \right| \leq G_0, \quad (1)$$

$$c_n \frac{\partial T}{\partial t} + c_{ж} v \left(\frac{\partial T}{\partial x} + \varepsilon \frac{\partial P}{\partial x} - \eta G_0 \frac{\frac{\partial P}{\partial x}}{\left| \frac{\partial P}{\partial x} \right|} \right) - \eta m c_{ж} \frac{\partial P}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \left| \frac{\partial P}{\partial x} \right| > G_0, \quad (2)$$

$$t > 0; \quad x > x_0,$$

с начальным

$$T|_{t=0} = 0 \quad (3)$$

и граничным условиями:

$$T|_{x=x_0} = T_0(t). \quad (4)$$

По заданному дебиту распределение давления находится из уравнения:

$$v = -\frac{k}{\mu} \left(\frac{\partial P}{\partial x} - G_0 \frac{\frac{\partial P}{\partial x}}{\left| \frac{\partial P}{\partial x} \right|} \right) = \frac{Q}{S}. \quad (5)$$

Считаем известным давление на забое

$$P(x_0) = P_0. \quad (6)$$

Выражение для поля давления при стационарной фильтрации аномальной жидкости имеет вид:

$$P(x) = P_0 - \left(G_0 + \frac{Q}{S} \frac{\mu}{k} \right) (x - x_0). \quad (7)$$

Скорость конвективного переноса тепла и линеаризованное уравнение состояния имеют вид:

$$u = -\frac{c_{ж}}{c_n} \frac{k}{\mu} \left(\frac{\partial P}{\partial x} - G_0 \frac{\frac{\partial P}{\partial x}}{\left| \frac{\partial P}{\partial x} \right|} \right), \quad (8)$$

$$\rho = \rho_0. \quad (9)$$

Рассмотрим случай, когда пренебрегается теплопроводностью.

После подстановки уравнений (6) и (7) в (1) получаем уравнение в частных производных первого порядка:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{c_{жс}}{c_n} \frac{Q}{S} \left(\frac{\partial T}{\partial x} + G_0(\eta - \varepsilon) - \varepsilon \frac{\mu}{k} \frac{Q}{S} \right) = 0,$$

при

$$\left| \frac{\partial P}{\partial x} \right| > G_0. \quad (9)$$

Решение этого уравнения получено методом характеристик и имеет вид:

$$T = -\frac{c_{жс}}{c_n} \frac{Q}{S} \left(G_0(\eta - \varepsilon) - \varepsilon \frac{\mu}{k} \frac{Q}{S} \right) t, \quad x > x_0 + \frac{c_c}{c_n} \frac{Q}{S} t \quad (10)$$

$$T = -\frac{c_{жс}}{c_n} \frac{Q}{S} \left(G_0(\eta - \varepsilon) - \varepsilon \frac{\mu}{k} \frac{Q}{S} \right) (x - x_0) \frac{c_{жс}}{c_n} \frac{S}{Q} + T_0 \left\{ t - (x - x_0) \frac{c_{жс}}{c_n} \frac{S}{Q} \right\},$$

$$x < x_0 + \frac{c_{жс}}{c_n} \frac{Q}{S} t$$

Анализ аналитического решения показал, что температура в потоке жидкости для прямолинейно-параллельного течения меняется при малых x по линейному закону и на больших расстояниях не зависит от x , а зависит только от времени.

Библиографический список

1. Хусаинова Г.Я. Способ определения начального градиента давления в нефтяных пластах. // Автоматизация. Современные технологии. – 2017. – Т. 71. – № 9. – С. 412-415.
2. Хусаинова Г.Я. Нестационарная фильтрация вязкопластичной жидкости в пласте // Автоматизация. Современные технологии. – 2018. – Т. 72. – № 4. – С. 147-149.
3. Хусаинов И.Г. Тепловые процессы при акустическом воздействии на насыщенную жидкостью пористую среду // Вестник Башкирского университета. – 2013. – Т. 18. – № 2. – С. 350-353.
4. Хусаинов И.Г., Хусаинова Г.Я. Исследование параметров пласта методом опрессовки // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 3. URL: <http://www.science-education.ru/117-13813> (дата обращения: 04.06.2021).

Сведения об авторах

Хусаинова Гузалия Ядкарвна, кандидат физико-математических наук, доцент СФ БашГУ. E-mail: gkama@mail.ru.

УДК 532.546:534.1

Шагапов В.Ш., Рафикова Г.Р., Каримова Г.Р.

ВОЛНЫ СТОУНЛИ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА ЖИДКОСТИ И ПЛАСТА, НАСЫЩЕННОГО ГИДРАТОМ

В статье рассматривается процесс распространения поверхностных акустических волн на границе раздела «вода - песок, насыщенный газогидратом». Получены уравнения для нахождения волнового числа, скорости волны Стоунли. Определен диапазон частот в зависимости от глубины проникновения волны.

Ключевые слова: продольные волны, поперечные волны, волна Стоунли, песок, газогидрат.

Shagapov V.Sh., Rafikova G.R., Karimova G.R.

STONELEY WAVES AT THE INTERFACE BETWEEN A LIQUID AND A LAYER SATURATED GAS HYDRATE

The article considers the process of propagation of surface acoustic waves at the interface «water-sand saturated with gas hydrate». The equations for finding the wave number and the Stonely wave velocity are obtained. The frequency range is determined depending on the depth of the wave penetration.

Keywords: longitudinal waves, transverse waves, Stonely wave, sand, gas hydrate.

Одним из самых перспективных источников энергии с большим содержанием углеводородов являются природные газогидраты, для которых благоприятной средой образования являются донные отложения в водоемах мирового океана. Построение математических моделей волновых процессов на границе «вода – гидратонасыщенные породы» позволит более детально развивать теоретические основы методов обнаружения и освоения подобных залежей. Исследования методом акустического зондирования гидратосодержащих пород позволят по акустическим свойствам (скоростям и проникновению продольных, поперечных волн и волн Стоунли) определить плотность содержания газогидратов в пластах и масштабы таких пластов. Свойства и характеристики волн Стоунли были изучены в работах [1, 2, 3, 5, 6]. Теоретическое изучение волны Стоунли дает возможность ин-

терпретировать зависимости от соотношения между акустическими свойствами жидкости и твердого полупространства [4].

В данной работе рассматривается задача исследования процесса распространения волны Стоунли на границе «вода – порода, насыщенная газогидратом». Предполагаем, что плоская гармоническая поверхностная волна распространяется в положительном направлении оси x вдоль плоской границы $z=0$. В двух средах волна представлена суммой продольных и поперечных волн, которые удовлетворяют уравнениям неразрывности, импульсов, волновым уравнениям. Смещения частиц представлены через скалярный и векторный потенциалы. Получены зависимости для скоростей продольных и поперечных волн в пористой среде, насыщенной водой и гидратом метана, в зависимости от насыщенности флюидом на основе экспериментальных данных [7]. В зависимости от полученных скоростей продольных и поперечных волн найдена скорость волны Стоунли; зависимость скорости волны Стоунли от насыщенности песка флюидом. Определен диапазон частот в зависимости от глубины проникновения волны в среду, построены эволюции полей давления, смещения частиц в различные моменты времени.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-11-00207, <https://rscf.ru/project/21-11-00207/>.

Библиографический список

1. Stoneley R. Elastic Waves at the Surface of Separation of Two Solids, Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character, Vol. 106, № 738 (Oct. 1, 1924), pp. 416-428.
2. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. – М.: Наука, 1973.
3. Викторов И.А. Звуковые поверхностные волны в твердых телах. – М.: Наука, 1981.
4. Волькенштейн М.М., Левин В.М. «Структура волны Стоунли на границе вязкой жидкости и твердого тела» // Акуст. Журн. 1988. – Т. 34. – № 4. – С. 608-615.
5. Викторов И.А., Грищенко Е.К., Какина Т.М. «Исследование распространения ультразвуковых поверхностных волн на границе твердого тела с жидкостью» // Акуст. Журн. 1963. – Т. 9. – № 2. – С. 162-170.
6. Губайдуллин А.А., Болдырева О.Ю. Волны в пористой среде со слоем, содержащим газовый гидрат // Прикладная механика и техническая физика. – 2020. – Т. 61. – № 4.

7. Дучков А.Д., Дучков А.А., Дугаров Г.А., Дробчик А.Н. Скорости ультразвуковых волн в песчаных образцах, содержащих воду, лёд или гидраты метана и тетрагидрофурана // Доклады академии наук. 2018. – Т. 478. – № 1. – С. 94-99.

Сведения об авторах

Шагапов Владислав Шайхулагамович, доктор физико-математических наук, профессор ИМех УФИЦ РАН (Уфа). E-mail: shagapov@rambler.ru.

Рафикова Гузаль Ринатовна, кандидат физико-математических наук, ученый секретарь ИМех УФИЦ РАН (Уфа). E-mail: rafikova_guzal@mail.ru.

Каримова Гульназ Римовна, аспирант ИМех УФИЦ РАН (Уфа). E-mail: gulnazkar69@gmail.com.

УДК 532.59

Шагапов В.Ш., Рафикова Г.Р., Мамаева З.З.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАТУХАЮЩИХ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ЖИДКОСТИ В СКВАЖИНЕ, ВОЗНИКШИХ ПРИ ГИДРОУДАРЕ

В статье рассматриваются собственные колебания столба жидкости в скважине, сообщаемой с пластом, полученные путем гидроудара. Исследовано влияние основных параметров скважины и призабойной зоны на зависимости частоты колебаний жидкости, коэффициента затухания и декремента затухания и изучена динамика давления в различных точках скважины.

Ключевые слова: собственные колебания, собственные частоты, гидроудар, скважина, фильтрация жидкости, затухающие колебания.

Shagapov V.Sh., Rafikova G.R., Mamaeva Z.Z.

INVESTIGATION OF DAMPED NATURAL OSCILLATIONS OF FLUID IN A WELL ARISING FROM WATER HAMMER

The article discusses the natural oscillations of the liquid column in the well connected to the formation, obtained by hydraulic shock. The influence of the main parameters of the well and the bottomhole zone on the

dependence of the frequency of fluid oscillations, the damping coefficient and the damping decrement was investigated, and the dynamics of pressure at various points of the well was studied.

Key words: natural vibrations, natural frequencies, water hammer, well, fluid filtration, damped vibrations.

В нефтяной промышленности важен контроль за состоянием скважины и призабойной зоны. Данная тема является актуальной при добычи полезных ископаемых, особенно, после работ, связанных с повышением дебита скважины. Необходимо получить информацию о призабойной зоне, а именно, о проницаемости пласта, качестве перфорации, гидроразрыв пластов. Изучить представленный вопрос, возможно, применяя большое количество методов, один из которых – акустическая спектроскопия скважин [1,2]. Экспериментальные данные возмущений жидкости в скважине при гидроударе рассмотрены в работе [3], так же в работе [4] представлены математическая модель и проведено сравнение с результатами.

В работе показана математическая модель, описывающая колебания столба жидкости в вертикальной скважине, возникающих при гидроударе в стволе скважины. Для описания модели использованы уравнения сохранения масс и импульсов в области скважины, уравнения сохранения масс в области открытого участка скважины, уравнение для описания упругого режима фильтрации в сообщаемом со скважиной пласте [5]. Используя решение уравнения в виде стоячих волн с учетом граничных и начальных условий получено характеристическое уравнение для определения комплексных частот. Исходя из данного уравнения проведен анализ влияния основных параметров скважины на изменение частоты колебания, декремента затухания и коэффициента затухания, и исследовано поведение давления в разных точках скважины.

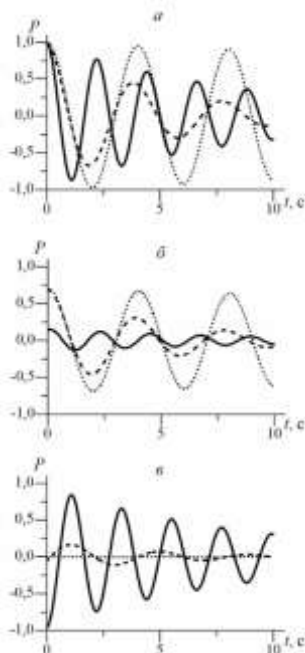


Рис. 1. Динамика давления в датчиках, расположенных в точках скважины 0 м (а), 750 м (б) и 1500 м (в). Сплошная, штриховая и точечная линии соответствуют значениям проницаемости $k_p = 10^{-14} \text{ м}^2$, 10^{-12} м^2 , 10^{-10} м^2

На рис.1 (а), (б) и (в) показана динамика давления датчиков, которые находятся в точках скважины 0 м (а), 750 м (б) и 1500 м (в) для различных коэффициентов проницаемости. Видно, что в случае значений проницаемости 10^{-12} , 10^{-10} м^2 затухание колебаний происходит быстрее и амплитуда колебаний уменьшается с увеличением глубины скважины. При значении проницаемости 10^{-14} м^2 самая низкая амплитуда колебаний наблюдается в точке 750 м, в начале и в конце скважины наблюдается приблизительно равная амплитуда колебаний.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-11-00207, <https://rscf.ru/project/21-11-00207/>.

Библиографический список

1. Физическая акустика: в 2-х т. / ред. У. Мэзон – Москва: Мир, 1969 – 422 с. – 2 т.
2. Горное дело: Терминологический словарь / ред. К. Н. Трубецкой, Д.Р. Каплунова. – 5-е изд., перераб. и доп. – Москва: Горная книга, 2016 – 635 с. ISBN 978-5-98672-435-5
3. Wang X., Hovem K., Moos D., Quan Y. Water hammer effects on water injection well performance and longevity // SPE Intern. symp. and exhibition on formation damage control, Lafayette (USA), 13–15 Febr. 2008. SPE 112282.
4. Ляпидевский В.Ю., Неверов В.В., Кривцов А.М. Математическая модель гидроудара в вертикальной скважине // Сиб. электрон. мат. изв. 2018. – № 15. – С. 1687–1696.
5. Шагапов В.Ш., Башмаков Р.А., Рафикова Г.Р., Мамаева З.З. Затухающие собственные колебания жидкости в скважине, сообщаемой с пластом // Прикладная механика и техническая физика. 2020. – № 4. – С. 5-14.

Сведения об авторах

Шагапов Владислав Шайхулагазович, доктор физико-математических наук, профессор ИМEx УФИЦ РАН. E-mail: Shagapov@ Rambler.ru.

Рафикова Гузаль Ринатовна, кандидат физико-математических наук, ученый секретарь ИМEx УФИЦ РАН. E-mail: guzal@mail.ru.

Мамаева Зилия Зайтовна, аспирант, младший научный сотрудник ИМEx УФИЦ РАН. E-mail: zilia16@mail.ru.

УДК 538.9

Ягафарова З.А., Сафаргалиев Д.И., Ягафаров С.Р.

ЗОННАЯ СТРУКТУРА ДИХАЛЬКОГЕНИДА ЦИРКОНИЯ И ЕГО ИНТЕРКАЛАТНОГО СОЕДИНЕНИЯ

В статье представлены результаты исследования особенностей кристаллической и зонной структуры слоистого дихалькогенида переходного металла – диселенида циркония и его интеркалатного соединения на основе серебра. Представлены рассчитанные схемы зонной структуры.

Ключевые слова: слоистые материалы, дихалькогениды переходных металлов, интеркалатные соединения, кристаллическая структура, зонная структура.

Yagafarova Z.A., Safargaliev D.I., Yagafarov S.R.

ZONE STRUCTURE OF ZIRCONIUM DICHALCOGENIDE AND ITS INTERCALATE COMPOUND

The article presents the results of a study of the features of the crystal and band structure of a layered transition metal dichalcogenide – zirconium diselenide and its intercalate compound based on silver. The calculated schemes of the band structure are presented.

Key words: layered materials, transition metal dichalcogenides, intercalate compounds, crystal structure, band structure.

Дихалькогениды циркония интеркалированные серебром относятся к широкому классу интеркалатных соединений на основе слоистых дихалькогенидов переходного металла (СДПМ). СДПМ на основе IVB, VB, VIB подгрупп являются весьма перспективными в качестве исходных решеток-матриц для интеркалирования и они с успехом могут использоваться в качестве электродных материалов новых поколений химических источников тока. Интерес к этим соединениям обуславливается также возможностями применения в науке и технике как новые гиперанизотропные материалы, твердые смазки, катализаторы, сверхпроводники и т.п.

Структуру СДПМ можно представить в виде набора структурных блоков, состоящих из слоя атомов переходного металла, заключенного между двумя слоями атомов халькогена. Слабость сил, связывающих "сэндвичи", является причиной легкости, с какой в пространстве между ними (в так называемую Ван-дер-Ваальсовскую щель) могут быть внедрены (интеркалированы) многие атомы и органические молекулы, являющиеся электронными донорами. Электростатические силы между положительно заряженными слоями интеркаланта и отрицательно заряженными "сэндвичами" стабилизируют подобные слоистые структуры.

Атомы переходного металла и атомы халькогена образуют плоские, гексагональные решётки. Однако, друг относительно друга эти решётки, могут быть расположены различными способами. Существует две различные возможности расположения халькогенных решёток относительно решётки переходного металла, приводящие к

двум типам координации: тригонально-призматической и октаэдрической (последняя может иметь тригональные искажения). СДПМ, в которых атомы переходного металла координированы октаэдрически, кристаллизуются в структурном типе CdI_2 , в то время как СДПМ с тригонально – призматической координацией могут иметь структуру MoS_2 или NbS_2 . СДПМ IV группы, будучи стехиометрическими, кристаллизуются только в структуре CdI_2 [1,2].

Различие в координации у СДПМ IV и V групп, по видимому, связано с различным характером химической связи. Можно проследить соотношение между степенью ионности связи металл-халькоген и степенью тригонально-призматической деформации халькогенного октаэдра: чем более ковалентна эта связь, тем сильнее деформирован октаэдр. Расстояние между ближайшими атомами халькогена в структуре NbS_2 (2H-модификация) меньше, чем в структуре CdI_2 (1T-модификация), поэтому в соединениях с большой степенью ионности связи, и следовательно, с большими эффективными зарядами на атоме халькогена выгоднее 1T-модификация. Это и объясняет устойчивость 1T-модификации у всех СДПМ IV группы.

Стабильность тригонально – призматической координации по сравнению с октаэдрической координацией обсуждалась уже в 1932 году Pauling [3] и Hultgren [4] на примере сульфида молибдена (MoS_2). Они указали, что шесть эквивалентные гибридные орбитали создаваемые из s, p и d орбиталей приводят к тригонально-призматической конфигурации, которая является более предпочтительней по сравнению с октаэдрической ориентацией. В октаэдрической конфигурации отталкивания между атомами лиганда или ионами меньше. Если связи преимущественно ионные или если радиус атомов лиганда очень большой, то реализуется октаэдрическая координация. Другим важным фактором является взаимное расположение энергетических уровней s-, p- и d- состояний и число несвязанных электронов, не участвующих в связи. Ковалентные связи присущи для переходных металлов с низкой d- конфигурацией (d^0, d^1, d^2), слоистые составы ионов переходного металла, имеющие высокую d конфигурацию ($d^n, n \geq 3$) показывают исключительно октаэдрическую координацию. Атомы переходного металла групп IVB, VB, и VIB с маленькими значениями d-конфигурации кристаллизуются в обеих структурах. В этих материалах выбор зависит от отношения радиуса катиона к радиусу аниона и доли ионности характера связи металл-халькоген. В виде таблицы приведем данные по рассмотренным нами СДПМ:

ZrS₂, ZrSe₂ и ZrTe₂. Эффективный радиус определяется с учетом, что размер аниона равен половине параметра решетки «а» и радиус катиона вычисляется вычитанием значения эффективного радиуса аниона от экспериментальных длин связи.

Таблица 1. Параметры структуры дихалькогенидов циркония

Мат-рица	$a_H^c \left(\text{\AA} \right)$	$c_H^c \left(\text{\AA} \right)$	$a_H/2R_X^d$	$d_{TX}^e \left(\text{\AA} \right)$	d_{TX}/a_H
ZrS ₂	3.662	5.813	0.995	2.56	0.699
ZrSe ₂	3.770	6.138	0.952	2.66	0.706
ZrTe ₂	3.950	6.630	0.894	2.82	0.714

Используя эффективный радиус было получено критическое значение отношения радиуса катиона к радиусу аниона равное 0.49, что является близким к значению 0.527 (для жестких сфер). Это говорит о том, что СДПМ IVB, VB, и VIB групп кристаллизовались бы в тригонально–призматической структуре, если бы удовлетворялись соответствующие геометрические требования. Другими словами, если размеры атома переходного металла малы, то силы межъядерного отталкивания вынуждают ионы халькогена принимать главным образом плотно-упакованное расположение.

В работе представляется рассчитанная модель электронной структуры СДПМ ZrSe₂ и интеркалатного соединения Ag_{0,25}ZrSe₂. Впервые модель зонной схемы для дисульфидов переходных металлов была рассмотрена Вильсоном [5] на основе анализа оптических свойств СДПМ.

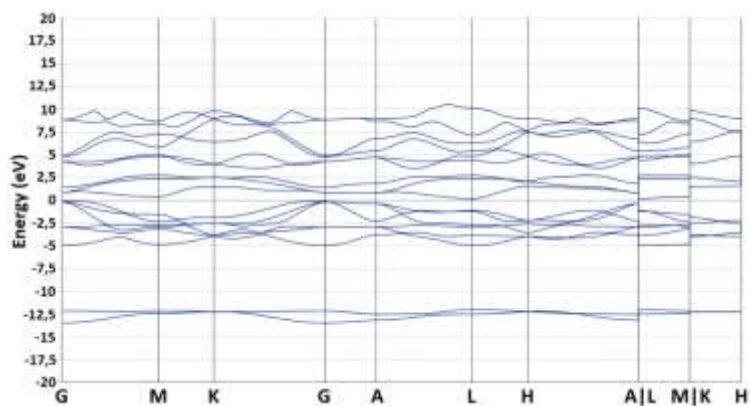
Рассмотрим зонную структуру исходной решетки матрицы ZrSe₂. В диселениде циркония атомы Zr шестикратно координированы атомами Se, с локальной кубической симметрией, а элементарная ячейка имеет один атом Zr и два атома Se. Ось z кристалла, которая обычно выбирается вдоль с-оси, находится под углом 45° к шести осям симметрии второго порядка. Валентная зона в этом соединении образована орбиталями, сосредоточенными в основном на атомах халькогена, в то время как образующие зону проводимости d-орбитали сосредоточены на атомах металла. Обозначение энергетических зон в соответствии с основными вкладами атомных орбиталей осуществляется частично для удобства. В действительности, при образовании энергетических зон происходит смешивание атомных орбиталей. Это смешивание может происходить для различных орбита-

лей одного и того же атома или для орбиталей различных атомов в элементарной ячейке. Оценки показывают, что d-подобная зона проводимости может содержать до 25% примесей р-орбиталей и, аналогично, валентная р-подобная зона до 25% d-орбиталей [6].

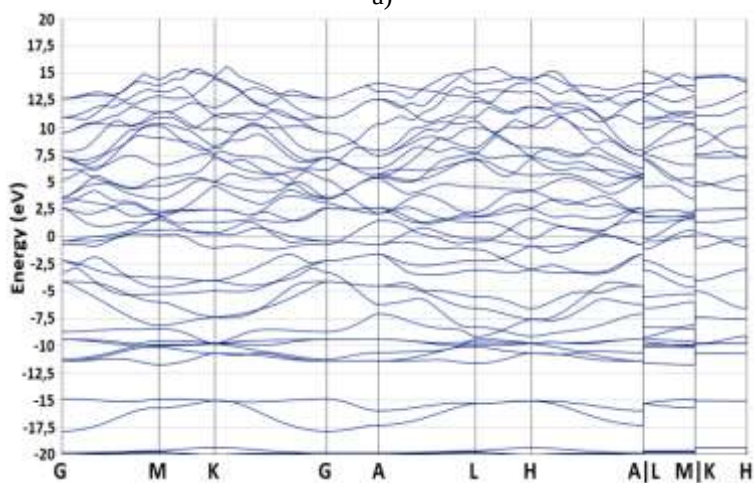
Как известно, d-зона содержит пять различным образом ориентированных орбиталей: d_{xy} , d_{yz} , d_{zx} , $d_{x^2-y^2}$ и d_z^2 . Орбитали d_{yz} и d_{zx} направлены вдоль связи металл – халькоген и поэтому довольно сильно смешаны с р-орбиталями халькогена. Это увеличивает энергию d_{yz} , d_{zx} -зон из-за взаимодействия связующих и разрыхляющих орбиталей. Орбитали $d_{x^2-y^2}$, d_{xy} и d_z^2 должны были бы быть вырождены в центре зоны Бриллюэна, если бы атом Zг имел бы халькогенное окружение с идеально кубической симметрией. Однако в слоистых соединениях такое не встречается. Поэтому для орбиталей d_{xy} и $d_{x^2-y^2}$, лежащих в плоскости (XY) точно посередине между слоями халькогена, смешивание с s-, р-орбиталями халькогена оказывается большим, чем для d_z^2 -орбитали, хотя и меньшим, чем для d_{yz} , d_{zx} -орбиталей. Это приводит к тому, что самую меньшую энергию из d-орбиталей имеет d_z^2 -орбиталь. Эта орбиталь, будучи направлена вдоль оси с, слабо перекрывается с d_z^2 -орбиталями соседних атомов как в плоскости того же слоя, так и в соседних слоях, образуя узкую зону с шириной от 2эВ для 1T-TaS₂ до 0.7эВ для 1T-VSe₂. Являясь самой нижней из d-зон, d_z^2 -зона определяет многие оптические и электронные свойства СДПМ.

Используя аналогичный подход, р-орбитали халькогена можно разделить на направленные вдоль с-оси (p_z) лежащие в плоскости, параллельной слою (p_x , p_y). Вспоминая, что в элементарной ячейке содержатся два атома халькогена, молекулярные орбитали могут быть получены из связующих и разрыхляющих пар этих р-орбиталей.

На рис. 1 представлены рассчитанные схемы зонной структуры для слоистого материала диселенида циркония и его интеркалатного соединения с серебром. Для расчетов использовались данные, полученные при определении параметров кристаллической структуры [1,2]. Расчеты зонной структуры показали справедливость зонной схемы, предложенной Вильсоном [5] и продемонстрировали зависимость электронной структуры СДПМ от симметрии координации атомов переходного металла атомами халькогена.



a)



b)

Рис.1. Схемы зонной структуры, рассчитанные для ZrSe_2 (a) и $\text{Ag}_{0,25}\text{ZrSe}_2$ (b)

Далее в виде таблицы приводим данные зонной структуры ди-халькогенидов IVa группы.

Таблица 2. Характеристики зонной структуры решеток-матриц
(ZrX_2 , $X=Se, Te$) в (eV)

Мат- рица	Уровень р-зоны	Уро- вень d- зоны металла	Ши- рина s-зоны	s-р щель	Шири- на р-зоны	Ши- рина d- зоны	р-d щел ь
$ZrSe_2$	4.8	-4.2	2.0	6.3	5.4	4.1	1.0
$ZrTe_2$	4.6	-3.8	2.5	3.7	6.0	3.7	0.1

Отношение параметров элементарной ячейки «с/а» принято считать характеризующим степень тригонально–призматического искажения халькогенного октаэдра. Для идеального октаэдра это отношение равно 1.633. Однако, реально с/а меняется от 1.587 для ZrS_2 , 1.628 – для $ZrSe_2$, до 1.668 – для $ZrTe_2$. Для СДПМ VI группы это отношение может достигнуть значения 1.98 и октаэдрическая координация становится уже неустойчивой.

Тригонально–призматическое искажение оказывает двоякое влияние на зонную структуру. Во-первых, из растяжения октаэдра d_z^2 -зона отделяется от d_{xy,x^2-y^2} -зоны и смещается в сторону низких энергий. Так в СДПМ VI группы d_z^2 -зона примыкает к р-подобной валентной зоне и, видимо, даже несколько перекрывается с ней. Во-вторых, тригонально–призматическое искажение сопровождается ростом степени ковалентности. Как ранее упоминалось, это приводит к увеличению гибридизации d-орбиталей металла и р-орбиталей халькогена. Поскольку сильнее всего гибридизируются $d_{zx, yz}$ -орбитали, то при увеличении тригонально–призматического искажения усиливается расщепление этой зоны и d_{xy,x^2-y^2} при одновременном смещении $d_{zx, yz}$ -орбитали в сторону более высоких энергий [3]. Тригонально – призматическое искажение понижает энергию электронов, однако этот выигрыш в энергии с хорошей точностью компенсируется возросшей энергией отталкивания между сблизившимися атомами халькогена. Таким образом, эти два вклада хорошо скомпенсированы в СДПМ V группы, а в СДПМ VI и IV групп доминирует первый и второй вклад, соответственно.

Библиографический список

1. Ягафарова З.А., Титов А.Н. Физика твердого тела. 2003. – Т. 45. – С.1968-1972.

2. Ягафарова З.А., Титов А.Н., Биккулова Н.Н. Известия Академии Наук. Серия физическая. 2002. – Т.66. – № 6. – С.874-877.
3. Pauling L. // J.Am.Chem. Soc. –1932. – Vol. 54. –Р. 988.
4. Hultgren R. // Phys.Rev. – 1932. – Vol.40. – Р. 891.
5. Wilson J.A.,Yoffe A.D. // Adv. Phys. –1969. – Vol.18. – № 73.
6. Bullet D.W. // J. Phys. C: Solid State Phys. –1978. – Vol. 11. – P. 4501–4514.

Сведения об авторах

Ягафарова Зульфия Абдулхаевна, кандидат физико-математических наук, доцент СФ Баш ГУ (Стерлитамак), E-mail: zulfiya_abdul@mail.ru.

Сафаргалиев Данир Ильдарович, аспирант (Стерлитамак), E-mail: danirsafargaliev@gmail.com.

Ягафаров Салават Рафилевич, студент УГАТУ (Уфа) E-mail: salavat.yagafaroff@gmail.com.

Секция 4
**«ВИРТУАЛЬНАЯ И ДОПОЛНЕННАЯ РЕАЛЬНОСТЬ,
ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ»**

УДК 004.8

Абдрафикова Ф.Ф., Муравьева Е.А., Шарипов М.И.

**ПРЕДСКАЗАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПРОДУКТИВНОСТИ
ДОБЫВАЮЩЕЙ СКВАЖИНЫ С ПОМОЩЬЮ МАШИННОГО
ОБУЧЕНИЯ В ПРОГРАММЕ MATLAB**

В статье рассматривается регрессионная модель, предназначенная для предсказания коэффициента продуктивности добывающей скважины. Данная модель разработана с помощью машинного обучения в программе Matlab.

Ключевые слова: добывающая скважина, коэффициент продуктивности скважины, машинное обучение, насос, регрессионная модель.

Abdrafikova F.F., Muravyova E.A., Sharipov M.I.

**PREDICTING THE PRODUCTIVITY COEFFICIENT OF A
PRODUCING WELL USING MACHINE LEARNING IN THE
MATLAB PROGRAM**

The article considers a regression model designed to predict the productivity coefficient of a producing well. This model was developed using machine learning in the Matlab program.

Keywords: production well, well productivity coefficient, machine learning, pump, regression model.

Обучающий набор данных состоит из входных и выходных переменных [3]:

1. Дебит добывающей скважины (Q , т/сут).
2. Пластовое давление добывающей скважины (P_p , МПа).
3. Забойное давление добывающей скважины (P_z , МПа).
4. Депрессия на пласт добывающей скважины (DP , МПа).
5. Коэффициент продуктивности добывающей скважины (K , т/(сут*МПа)).

6. Состояние насоса нагнетательной скважины (P): насос включен (1 – On), либо выключен (0 – Off).

Для определения коэффициента продуктивности добывающей скважины (K), необходимо знать: дебит добывающей скважины (Q), пластовое давление добывающей скважины (Pp) и забойное давление добывающей скважины (Pz). Когда значение коэффициента продуктивности добывающей скважины (K) становится равным или менее чем $0,22 \text{ т}/(\text{сут} \cdot \text{МПа})$, происходит включение насоса нагнетательной скважины (P) – 1 (On). После того, как коэффициент продуктивности добывающей скважины (K) становится выше $0,22 \text{ т}/(\text{сут} \cdot \text{МПа})$, происходит выключение насоса нагнетательной скважины (P) – 0 (Off).

Моделирование проводилось для Восточного участка Чутырско-Киенгопского месторождения, на котором располагается:

1. 26 добывающих скважин: 1083R, 1087R, 1214, 1215, 1216, 1219, 1220, 1221, 1222, 1223, 1224, 1225, 1227, 1228, 1229, 1231, 1232, 1233, 1234, 1235, 1237, 1238, 1239, 1240, 1241, 1242.

2. 13 нагнетательных скважин: 1090R, 1278, 1279, 1281, 1282, 1283, 1284, 1285, 1286, 1287, 1288, 1289, 1290.

Так как каждая добывающая скважина имеет по 3 входных переменных, то общее число входных переменных равно 78.

Так как каждая добывающая скважина имеет по 2 выходных переменных и учитывается состояние работы насоса 13 нагнетательных скважин, то общее число выходных переменных равно 65.

Была сформирована обучающая выборка, которая состоит из 42300 примеров (таблица 1). В данной выборке учитываются все переменные, задействованные в многомерных связях процесса и влияющие на процесс добычи нефти [2].

Таблица 1 – Обучающий набор данных

№	Q1083R	Pp1083R	Pz1083R	...	P1288	P1289	P1290
1	1,26	11,09	4,44	...	Off	Off	Off
2	1,17	11,21	4,30	...	Off	Off	Off
3	1,46	10,84	4,60	...	Off	Off	Off
...	...	...	...	...	...	...	...
42298	1,09	11,80	4,44	...	Off	Off	Off
42299	1,07	10,80	4,53	...	Off	Off	Off
42300	1,17	11,07	4,55	...	Off	Off	Off

В программе Matlab были считаны данные, переработаны и подготовлены для машинного обучения с целью предсказания коэффициента продуктивности скважины [1].

Была обучена регрессионная модель, предсказывающая коэффициент продуктивности скважины. Для этого использовали приложение Regression Learner.

Происходило обучение 4 моделей. Получили следующие значения среднеквадратических ошибок:

- Linear (1.1) – 0,0020968;
- Fine Tree (1.2) – 0,0008826;
- Medium Tree (1.3) – 0,00092497;
- Coarse Tree (1.4) – 0,0013357.

Анализируя полученные значения, сделан вывод, что Fine Tree (1.2) самая точная модель. Построен график невязок модели Fine Tree (1.2) с помощью PLOTS → Residuals Plot (рис. 1).

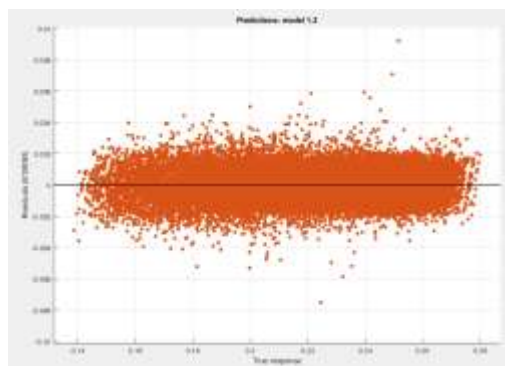


Рис. 1. График Residuals Plot модели Fine Tree (1.2)

Это и является среднеквадратичным отклонением, по которому мы вычисляем точность. По оси x отложен реальный коэффициент продуктивности 1083R добывающей скважины, который берется из исходных данных, а по оси y откладывается погрешность FineTree (1.2) модели. Модель после обучения предсказала коэффициент продуктивности скважины и сравнила его с коэффициентом, который был изначально известен. Анализируя график, видим, что когда коэффициент продуктивности 1083R добывающей скважины равен 0,24 т/(сут*МПа), то погрешность FineTree (1.2) модели находится в диа-

пазоне $[-0,002; 0,002]$. То есть настолько модель ошиблась на тех же данных, на которых она обучалась. В среднем, среднеквадратичная погрешность $\approx 0,0008826$.

Затем на графике Residuals Plot по оси x был отложен предиктор состояния насоса 1281 нагнетательной скважины (рисунок 2).

В зависимости от состояния насоса нагнетательной скважины ошибка предсказания почти одинакова и довольно маленькая. Таким образом, сделан вывод, что данная модель предсказывает достаточно хорошо.

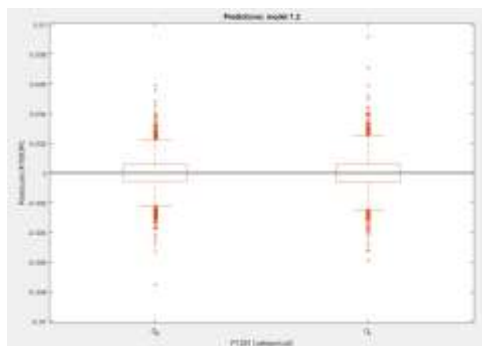


Рис. 2. График Residuals Plot модели Fine Tree (1.2) от P1281

Сравнили величину среднеквадратичной ошибки с медианным коэффициентом продуктивности 1083R добывающей скважины. Получили, что погрешность от медианного значения коэффициента продуктивности добывающей скважины составляет 0,0001 %.

Затем данная модель была использована, чтобы предсказать коэффициент продуктивности 1083R добывающей скважины для исходных данных, на которых она обучалась (рисунок 3). Получено 42300 значений, которые обозначают коэффициент продуктивности 1083R добывающей скважины.

```
load Analiz.mat
relRHS = 0,000025 / median(T1,K1083R) * 100
relRHS = 0
p = TrainedModel.predictFcn(T1)

p =
  0.2200
  0.2300
  0.2535
  0.3000
  0.2250
  0.2575
  0.2275
  0.2250
  0.3034
  0.2040
  :
```

Рис. 3. Предсказание K1083R

Сравнили предсказанный и реальный коэффициент продуктивности 1083R добывающей скважины. Для этого был построен график scatter (рисунок 4). Таким образом, сделан вывод, что данная модель работает и может предсказать значение.

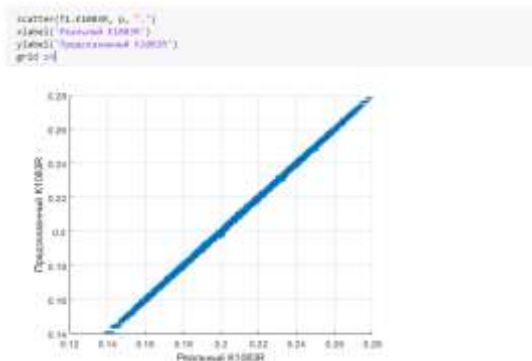


Рис. 4. График scatter

В программе Matlab была разработана модель машинного обучения для предсказания коэффициентов продуктивности добывающих скважин, которые влияют на работу насосов нагнетательных скважин.

Библиографический список

1. Вьюгин В.В. Математические основы машинного обучения и прогнозирования. – М., 2013. – 391 с.
2. Муравьева Е.А., Абдрафикова Ф.Ф., Газизова Г.И. Система управления технологическим процессом бродильного отделения на

основе нечеткого регулятора // Информационные технологии. Проблемы и решения. – 2020. – № 3 (12). – С. 136-141.

3. Абдрафикова Ф.Ф., Муравьева Е.А., Кулакова Е.С. Анализ видов и последствий отказов процесса добычи нефти // Всероссийская научно-практическая конференция (с международным участием) «Химия. Экология. Урбанистика». – 2020. – Т. 4. – С. 242-245.

Сведения об авторах

Абдрафикова Филюза Федоилловна, магистрант СтФ УГНТУ (Стерлитамак). E-mail: filuja-a@rambler.ru.

Муравьева Елена Александровна, доктор технических наук, профессор СтФ УГНТУ (Стерлитамак). E-mail: muraveva_ea@mail.ru.

Шарипов Марсель Ильгизович, кандидат технических наук, доцент СтФ УГНТУ (Стерлитамак). E-mail: muraveva_ea@mail.ru.

УДК 004.8

Коннов В.А., Муравьева Е.А., Шарипов М.И.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ ПРОГРАММНЫХ СИСТЕМ ПОДБОРА ОБОРУДОВАНИЯ УСТАНОВОК ЭЛЕКТРОЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ

В статье Проведен сравнительный анализ недостатков и преимуществ программных комплексов для подбора оборудования установок электроцентробежных насосов, определены перспективы их развития.

Ключевые слова: программы, методики, алгоритмы, установка электроцентробежного насоса, подбор оборудования.

V.A. Konnov, E.A. Muravyova, M.I. Sharipov

COMPARATIVE OVERVIEW OF MODERN SOFTWARE SELECTION SYSTEMS FOR ELECTRIC CENTRIFUGAL PUMPS

The article provides a comparative analysis of the disadvantages and advantages of software systems for the selection of equipment for electric centrifugal pump installations, and defines the prospects for their development.

Keywords: programs, methods, algorithms, installation of an electric centrifugal pump, selection of equipment

В некотором смысле выбор агрегатов электроцентробежных насосных установок относится к определению типоразмеров установок, обеспечивающих определенный дебит жидкости из скважины при оптимальных или близких к ним рабочих параметрах. В более широком понимании, выбор относится к выявлению ключевых показателей эффективности взаимосвязанной системы "нефтяной пласт – скважина – скважинный насосный агрегат" и выбору оптимальных сочетаний для этих показателей[1]. Оптимизацию можно проводить по разным критериям, но в любом случае она должна быть направлена на один конечный результат - снижение себестоимости тонны нефти [2].

Современные программные методики расчета – крупные и сложные системы, которые в ходе работы существенно упрощают работу нефтяников.

В общем виде, любой из методов расчета имеет определенный порядок действий[3]:

1. По данным промысла строится характеристика системы «пласт – скважина – насосная установка», которая именуется индикаторной диаграммой.

2. По выбранному критерию (это может быть максимально возможный дебит или минимальное забойное давление) определяются параметры необходимого насоса соответствующие одной или нескольким точкам на индикаторной диаграмме.

3. По выбранному критерию или ряду критериев (к примеру содержание свободного газа на приеме насоса или температура на приеме насоса) определяется глубина спуска для насосной установки.

4. По параметрам добываемой жидкости пересчитываются рабочие характеристики необходимых насосов.

5. По определенным ранее характеристикам выбираются насосы, обеспечивающие выбранный режим работы.

6. Рассчитываются условия эксплуатации выбранных насосных установок.

В современных условиях труда, ручной расчет на основе данного метода и большого массива данных по огромному количеству скважин является устаревшим методом требующим компьютеризации.

На сегодняшний день, в условиях автоматизации существующие методики и алгоритмы подбора стали реализовываться в программ-

ных комплексах, что повысило скорость и точность проведения расчетов. Самое большое применение нашли такие программные комплексы как «SubPUMP», «WellFlo», «PIPESIM», «Автотехнолог» и «NeoSel-Pro» [4].

Данные программы для подбора оборудования УЭЦН, применяются во многих крупных компаниях, так например, в АО «Сургут-нефтегаз» используются «SubPUMP» и «NeoSel-Pro». Программа «SubPUMP» позволяет опытному пользователю в короткий срок подобрать необходимое оборудование для УЭЦН завода-изготовителя имеющегося в базе данных. Также программа предлагает изучить все характеристики выбранного оборудования для выбора наиболее оптимальных. Программа NeoSel-Pro наиболее новую базу данных оборудования и позволяет подобрать его с высокой точностью[4]. Но также существуют некоторые недостатки выбранных программ. Так например в программе «SubPUMP», отсутствует русификатор, а также возможность самостоятельного выбора оптимальных характеристик из предложенного оборудования, отсутствуют данные с разными режимами работы скважин, в программе NeoSel-Pro недостатком является ручная обработка инклинограммы[5]. В программе «WellFlo» недостатком является отсутствие автоматического предложения по выбору оптимального насосного оборудования УЭЦН и необходим ручной подбор из вариантов.

Другими широко применяемыми программами являются «Автотехнолог» и «PIPESIM». «Автотехнолог» более современный комплекс, который позволяет проводить подбор всех типов насосных установок существующих в мире, а также проводить дополнительную оптимизацию работы системы «пласт - скважина - насосная установка» [6]. Данная программа, благодаря своей эффективности заняла прочное положение на нефтяных промыслах в России.

В программе «PIPESIM» от компании Schlumberger главной особенностью является то, что это открытая система, которая позволяет разработать модель от скважины до технологического оборудования, но недостатком является то, что в ней отсутствует база данных электронасосов российского производства[7]. Для наглядности, в таблице 1 выведены основные достоинства и недостатки рассмотренных программных комплексов.

Таким образом, были рассмотрены достоинства и недостатки существующих современных программных комплексов.

Дальнейшее развитие данных систем возможно с усовершенствованием модели подбора оборудования, повышением быстродействия и упрощением манипуляций со стороны человека. Данные задачи могут быть реализованы с внедрением в системы подбора оборудования обучаемых искусственных нейронных сетей, с помощью которых появится возможность гибкого реагирования системы на изменяющиеся условия добычи в скважинах и повышения скорости расчета.

Таблица 1. Сравнительная таблица достоинств и недостатков различных программных комплексов

Наименование комплекса	Достоинства	Недостатки
SubPUMP	В базе имеются российские марки производителей оборудования УЭЦН, хорошая производительность программы	Отсутствие русификатора, нет возможности самостоятельного выбора оптимальных характеристик из предложенного оборудования, отсутствуют данные с разными режимами работы скважин
WellFlo	Позволяет строить модель скважины графическим способом	Отсутствие автоматического предложения по выбору оптимального насосного оборудования УЭЦН и необходим ручной подбор из вариантов
PIPESIM	Интегрированное и открытое построение системы, позволяющее строить общую модель системы: «пласт – технологическое оборудование»	Отсутствие базы данных по российским маркам производителям оборудования УЭЦН
NeoSel-Pro	Новейшая база данных оборудования, возможность подбора оборудования к скважинам с нестационарным режимом работы	Ручная трудозатратная обработка инклинограммы
Автотехнолог	Виртуальная оптимизация работы система: «пласт – скважина – насос», позволяет вычислять оптимизацию по энергоэффективности.	Программа не учитывает искривление ствола скважины, имеет ошибки в базах данных и невысокое быстродействие, сложный интерфейс.

Библиографический список

1. Акульшин, А.И. Прогнозирование разработки нефтяных месторождений / А.И. Акульшин. – М.: Недра, 1988. С. 240.
2. Гребенюк, А.Н. Применение новых материалов и деталей в УЭЦН в скважинах с осложненными условиями эксплуатации / А.Н. Гребенюк // НТЖ "Территория "НЕФТЕГАЗ". 2006. № 10. С. 36.
3. Зейгман, Ю.В. Оптимизация работы УЭЦН для предотвращения образования осложнений / Ю.В. Зейгман, А.В. Колонских // НТЖ "Нефтегазовое дело". 2005. № 2. С. 1-9.
4. Соловьёв, И.Г. Критерии и алгоритмы стабилизации оптимального режима эксплуатации погружного насоса / И.Г. Соловьёв, В.В. Фомин, С.Г. Басов, А.Г. Кожин // Журнал "Известия вузов. Нефть и газ". Тюмень: ТюмГН-ГУ.2010. № 6. С. 51-54.
5. Соловьёв, И.Г. Вопросы информатизации и управления эксплуатацией скважин с погружным электронасосом / И.Г. Соловьёв // НТЖ "Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности". 2010. № 8. С. 43-47.
6. Субарев, Д.Н. Проблемы оперативного управления погружными установками системы "УЭЦН-скважина" в условиях малопродуктивных пластов / Д.Н. Субарев // НТЖ "Вестник кибернетики". 2011. № 10. С. 41-46.
7. Фролов, С.В. Обзор современных программ для подбора нефтедобывающего оборудования / С.В. Фролов, В.Н. Ивановский // НТЖ "Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности". 2000. № 9. С. 12.

Сведения об авторах

Коннов Виктор Андреевич, магистрант, ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», филиал в г. Стерлитамаке, Россия. E-mail: konnov.victor@gmail.com.

Муравьева Елена Александровна, доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой автоматизированных технологических и информационных систем, ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», филиал в г. Стерлитамаке, Россия. E-mail: muraveva_ea@mail.ru.

Шарипов Марсель Ильгизович, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированных технологических и информационных систем, Уфимский государственный нефтяной технический университет, филиал в г. Стерлитамаке, Россия. E-mail: muraveva_ea@mail.ru.

УДК 004: 519.6

Павлов О.Ю., Мулюков Р.Ф., Гимранов А.И., Халимов Б.А.

**ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНА ФОРМИРОВАНИЯ УПРАВЛЕНИЯ
И РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ ПИД
РЕГУЛЯТОРА**

Целью данной работы является изучение основных принципов регулирования объектами на основе ПИД регуляторов. Для достижения цели в работе решаются следующие задачи: изучение закона регулирования, разработка универсальной структурной схемы регулятора и разработка программной реализации регулятора.

Ключевые слова: адаптивное управление, роботизированная система, функциональная схема регулирования, закон регулирования, ПИД регулятор.

Pavlov O.Yu., Mulyukov R.F., Gimranov A.I., Halimov B.A.

**STUDYING THE LAW OF FORMATION OF CONTROL AND
DEVELOPMENT OF PROGRAM IMPLEMENTATION OF THE
PID REGULATOR**

The purpose of this work is to study the basic principles of regulation by objects based on PID controllers. To achieve the goal, the following tasks are solved in the work: studying the regulation law, developing a universal structural diagram of the regulator and developing a software implementation of the regulator.

Keywords: adaptive control, robotic system, functional diagram of regulation, regulation law, PID controller.

Основной задачей регуляторов является поддержание на одном уровне определенного значения. ПИД-регулятор или пропорциональный – интегральный и дифференциальный регулятор служит для того, чтобы воздействовать на объект управления и приводить значение регулируемого параметра к заданным уставкам, получая значения с датчиков (обратная связь).

Сигнал на рассматриваемый регулятор можно представить из следующих компонент: первая пропорциональна размеру сигнала, вторая является интегралом сигнала, третья является его производной. Один из этих компонентов может быть и не интегрирован в про-

цесс синтеза регулятора с объектом управления [1, 2]. В этом случае, регулятор может быть только пропорциональным, пропорциональным дифференциальным или пропорциональным и интегральным. Для управления объектами могут использоваться не только классические регуляторы, но и комбинированные схемы с нечёткими системами или нейросетевыми алгоритмами [2, 3, 4, 6, 8].

На рисунке показан пропорциональный – интегральный и дифференциальный регулятор (рис. 1).

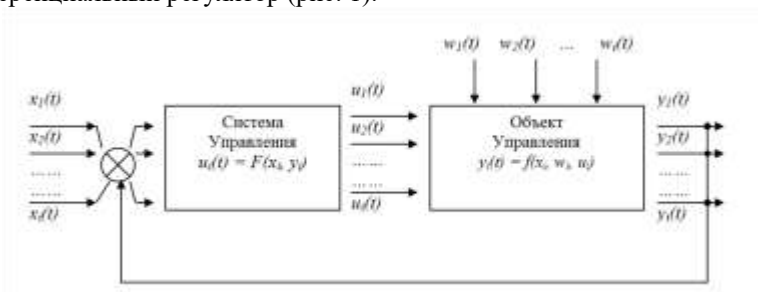


Рис. 1. Функциональная схема пропорционального-интегрального и дифференциального регулятора

Рассматриваемая схема регулятора является универсальной из-за того, что возможно получить любой закон регулирования при соответствующей настройке. График формирования закона идеального ПИД-регулятора показан на рисунке 2.

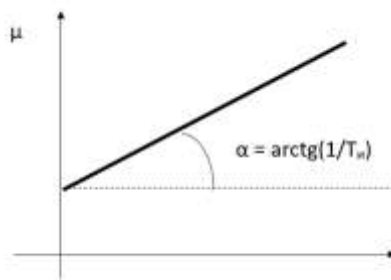


Рис. 2. Формирование закона регулирования для идеального ПИД регулятора

Для формирования данного закона регулирования разработан алгоритм работы программы [1, 2, 3]:

```
int main()
{
    double pre_error = 0;
    double integral = 0;
    double val = 20;
    for (int i = 0; i < 200; i++) {
        double inc = pid(0.1, 100, -100, 0.1, 0.01, 0.5, 16, val, &integral,
&pre_error);
        cout << fixed << setprecision(3) << "value: " << val << " " << ":
" << inc << endl;
        val += inc;
    }
    return 0;
}
```

На рисунке 3 показан график взаимодействия элементов программного кода [4, 6, 7].



Рис. 3. Взаимодействие элементов программного кода.

За работу регулятора отвечает разработанная функция:

```
double pid(double dt, double max, double min, double Kp, double  
Kd, double Ki, double setpoint, double preV, double* integral, double*  
pre_error).
```

Аналогичной же функцией может быть описана схема с нечеткой логикой для управления:

```
public double Mship  
{get{  
    return dMship;  
}set{  
    dMship = value;  
}  
}  
  
public double Min  
{get{  
    return dMin;  
}set{  
    dMin = value;  
}  
}
```

Таким образом, изучена структура пропорционального – интегрального и дифференциального регулятора. Предложена универсальная функциональная схема ПИД регулятора и изучено формирование закона регулирования для идеального ПИД регулятора. Предложена программная реализация регулятора на языке программирования C++ и схема взаимодействия элементов программного кода.

Библиографический список

1. Востриков А.С., Французова Г. А. Синтез пид-регуляторов для нелинейных нестационарных объектов // Автометрия. 2015. Т. 51, № 5. С. 53-60.
2. Дегтярев Г.Л., Сагдатуллин А.М. Разработка системы нейро-нечеткого прогнозирования концентрации содержащихся примесей при транспортировке нефтяной эмульсии со скважин // Математические методы в технологиях и технике. 2021. № 2. С. 110-113.
3. Дегтярев Г.Л., Сагдатуллин А.М. Разработка математических моделей прогнозирования процессов добычи и транспорта нефти в условиях неопределенности // Известия Санкт-Петербургского госу-

дарственного технологического института (технического университета). 2020. № 54. С. 71-75.

4. Никулин Е.Ф. Основы теории автоматического управления. Частотные методы анализа и синтеза систем: Учеб. пособие для вузов. СПб.: БХВ-Петербург, 2004. 631 с.

5. Сагдатуллин А.М. Применение методов нечеткой логики и нейронных сетей для автоматизации технологических процессов в нефтегазовом машиностроении и повышения эффективности добычи нефти // Интеллектуальные системы в производстве. 2021. Т. 19. № 2. С. 83-89.

6. Сагдатуллин А.М., Шамсутдинов Р.А. Разработка алгоритма улучшения качества изображений входного видеопотока для управления атомными транспортными средствами // Интеллектуальные системы в производстве. 2021. Т. 19. № 2. С. 90-95.

7. Сагдатуллин А.М. Разработка операторского интерфейса удаленного телеуправления для монитора реального времени заполнения смеси // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2020. Т. 76. № 1. С. 99-103.

8. Сагдатуллин А.М. Применение программы `siemensnx` в практико-ориентированном подходе обучения для подготовки высококвалифицированных кадров // Целевая подготовка кадров: направления, технологии и эффективность. Материалы международной научно-практической конференции. 2019. С. 206-208.

Сведения об авторах

Павлов Олег Юрьевич

Мулюков Рустам Фанилевич

Гимранов Айюб Ильдарович

Халимов Булат Алмазович

Сагдатуллин А.М.

**ПРИМЕНЕНИЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ ДЛЯ ПРИЛОЖЕНИЯ
ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ
РЕШЕНИЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ИЗМЕНЯЮЩИХСЯ
ПАРАМЕТРОВ**

Целью работы является исследование основных принципов нечёткой логики для прогнозирования работы предприятия в зависимости от изменяющихся параметров. К основным задачам можно отнести: анализ компонентов нечеткой логики, исследование методов разработки модели на основе нечеткой логики и составления программы приложения.

Ключевые слова: анализ информации, принципы нечеткой логики, информационная система, построение положения.

Sagdatullin A.M.

**APPLICATION OF FUZZY LOGIC TO APPLY FORECASTING
AND SUPPORT DECISION-MAKING DEPENDING ON
CHANGING PARAMETERS**

The aim of the work is to study the basic principles of fuzzy logic for predicting the operation of an enterprise depending on the changing parameters of parameters. The main tasks include: analyzing the components of fuzzy logic, researching methods for developing models based on fuzzy logic and composing an application.

Keywords: analysis of information, principles of fuzzy logic, information system, construction of a position.

В настоящее время информационные технологии играют важную роль при создании, поиске и обработке информации. Основными элементами архитектуры таких систем можно считать: источники данных, резервные и основные хранилища информации, средства потоковой обработки информации и обработки сообщений, аналитические блоки и системы передачи данных. В данной работе будет рассматриваться функционирование аналитического блока, построенного на основе нечеткой логики.

Нечеткая логика играет важную роль в работе многих интеллектуальных систем. Основой таких систем являются нечеткие множества, представляющие собой отображение входных параметров $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ в диапазоне от 0 до 1, где $\mu_A(x_i)$ - функция принадлежности [1, 3, 7].

Множество формируется исходя из набора возможных значений или диапазона, в котором существует заданное число.

$$A = \frac{\mu_A(x_1)}{x_1} + \frac{\mu_A(x_2)}{x_2} + \dots + \frac{\mu_A(x_3)}{x_3}; \quad (1)$$

Например, рассмотрим нечеткое множество, описывающее число «5» [2, 4, 5, 6]:

$$A = \frac{0,7}{4} + \frac{1}{5} + \frac{0,8}{6};$$

Функцию принадлежности для рассматриваемого числа можно представить следующей системой (2):

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & \text{если } x < a_1, \\ \frac{x - a_1}{a_2 - a_1}, & \text{если } a_1 < x < a_2, \\ 1, & \text{если } a_2 < x < a_3, \\ \frac{x - a_3}{a_4 - a_3}, & \text{если } a_3 < x < a_4, \\ 0, & \text{если } x > a_4, \end{cases} \quad (2)$$

где a_1, a_2, a_3, a_4 – коэффициенты формируемого множества.

Как правило, общие условия формирует набор антецедентов. Они являются связующим звеном между лингвистическими переменными и выходными термами. Нечеткие правила в форме «ЕСЛИ-ТО», так и нечеткие условные операторы представляют собой выражения вида: «ЕСЛИ» событие «А» «ТО» событие «В», где «А» и «В» являются консеквентами нечетких множеств, характеризующихся соответствующими функциями принадлежности:

$$\text{ЕСЛИ } x_k = A_k^i, \text{ то } K^i,$$

где x_k – значение входа ($k \in [0 \dots n]$, $n \in \mathbb{R}$), A_k^i – функция принадлежности k -го входного значения и i -го правила $i \in [0 \dots n]$, доверительный коэффициент.

Разработанное приложение для прогнозирования и поддержки и принятия решений может включать до шести уровней прямой связи, при этом никакое соединение не имеет особого веса. В результате вся логика находится исключительно в звеньях, представляющих нейроны и топологии соединения нейросети. Нейронная сеть может иметь функциональность контроллера с выводом Сугено, где для первого уровня обычно используется функция активации с максимумом, равными 1 и минимумом - 0 для функции принадлежности μ . Базу правил типа Сугено можно сформулировать, например, следующим образом [7-10]:

ПРЕДПОСЫЛКА x_1 ЕСТЬ A_1^1 И x_k ЕСТЬ A_k^1

ПРАВИЛА:

ЕСЛИ $x_1 = A_1^1$ И x_k ЕСТЬ A_k^1 , то y ЕСТЬ B^1 ,

... ..,

ЕСЛИ $x_1 = A_1^i$ И x_k ЕСТЬ A_k^i , то y ЕСТЬ B^i ,

... ..,

ЕСЛИ $x_1 = A_1^{i+n}$ И x_k ЕСТЬ A_k^{i+n} , то y ЕСТЬ B^{i+n} ,

ЛОГИЧЕСКИЙ ВЫВОД:

$$y = B^{i+n}$$

Таким образом, вербальная форма представления правил в формате «если-то», позволяет моделировать нечеткие способы рассуждения. Данный алгоритм играет важную роль в принятии решений в условиях неопределенности.

Библиографический список

1. Асадуллин В.М. Системы регулирования напряжения синхронного генератора с использованием нечеткой логики // Вестник уфимского государственного авиационного технического университета. Т. 8, № 4. 2006. С. 27-30.
2. Борисов В.В., Зернов М.М. Реализация ситуационного подхода на основе нечеткой иерархической ситуационно-событийной сети // Системы поддержки принятия решений. № 1. 2009. С. 17-30.
3. Дегтярев Г.Л., Сагдатуллин А.М. Разработка системы нейро-нечеткого прогнозирования концентрации содержащихся примесей

при транспортировке нефтяной эмульсии со скважин // Математические методы в технологиях и технике. 2021. № 2. С. 110-113.

4. Дегтярев Г.Л., Сагдатуллин А.М. Разработка математических моделей прогнозирования процессов добычи и транспорта нефти в условиях неопределенности // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). 2020. № 54. С. 71-75.

5. Леоненков, А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH / А.В. Леоненков. – СПб.: БХВ–Петербург, 2005. – 736 с.

6. Сагдатуллин А.М. Применение методов нечеткой логики и нейронных сетей для автоматизации технологических процессов в нефтегазовом машиностроении и повышения эффективности добычи нефти // Интеллектуальные системы в производстве. 2021. Т. 19. № 2. С. 83-89.

7. Сильнова, С.В. Поддержка принятия решений по комплексному оцениванию при управлении производством на основе нечеткой логики / С.В. Сильнова, В.В. Фаюршина // Information Technologies for Intelligent Decision Making Support (ITIDS'2015): Proceedings of the 3rd International Conference, Ufa, 18–21 мая 2015 года. – Ufa: ГОУ ВПО "Уфимский государственный авиационный технический университет", 2015. – С. 190-194.

8. Сагдатуллин А.М., Шамсутдинов Р.А. Разработка алгоритма улучшения качества изображений входного видеопотока для управления атомными транспортными средствами // Интеллектуальные системы в производстве. 2021. Т. 19. № 2. С. 90-95.

9. Яхьяева Г.Э. Нечеткие множества и нейронные сети: учеб. пособие Москва: ИнтернетУниверситет Информационных технологий; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. 316 с.

10. Zadeh, L.A. (2013). Fuzzy logic. In Computational Complexity: Theory, Techniques, and Applications (Vol. 9781461418009, pp. 1177–1200). Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-1800-9_73.

Сведения об авторах

Сагдатуллин Артур Маратович

Ягафарова З.А.

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА «ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЙ МЕТОД
ИЗУЧЕНИЯ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
ТВЕРДЫХ ЭЛЕКТРОЛИТОВ»**

В статье описывается лабораторная работа по физике конденсированного состояния предлагаемая на спецпрактикуме студентам и магистрантам, обучающимся по направлению подготовки «Физика». В лабораторной работе с использованием метода кулонометрического титрования будут изучаться такие термодинамические параметры твердых электролитов как энтропия и энтальпия.

Ключевые слова: лабораторная работа, спецпрактикум, физика конденсированного состояния, термодинамические параметры, энтропия, энтальпия.

Yagafarova Z.A.

**LABORATORY LESSON «ELECTROCHEMICAL METHOD FOR
STUDYING THERMODYNAMIC PARAMETERS OF SOLID
ELECTROLYTES»**

The article describes a new laboratory lesson on the physics of a condensed state offered at a special workshop for students and graduate students studying in the direction of training «Physics». In laboratory lesson using the coulometric titration method, such thermodynamic parameters of solid electrolytes as entropy and enthalpy will be studied.

Key words: laboratory lesson, special practice, condensed matter physics, thermodynamic parameters, entropy, enthalpy.

Исследуемые в лабораторной работе соединения – теллурид и селенид меди, интеркалаты диселенида и дителлурида циркония относятся к твердотельным материалам со смешанной ионно-электронной проводимостью и представляют большой интерес в связи с разнообразием физико-химических свойств [1]. Используемый в работе электрохимический метод кулонометрического титрования был впервые разработан и применен при определении протяженностей областей гомогенности халькогенидов Вагнером [2]. Данный метод также позволяет изучить изменение термодинамических пара-

метров смешанных ионно-электронных проводников в зависимости от состава и температуры.

Например, при исследовании параметров суперионного проводника теллурида меди кривые кулонометрического титрования были получены с помощью электрохимической ячейки типа $Cu|CuBr|Cu_{2-\delta}Te$, где в качестве электронного фильтра использовалось соединение с чисто ионной проводимостью $CuBr$, Cu – металлическая медь, $Cu_{2-\delta}Te$ – исследуемое соединение. Схема экспериментальной установки приводится на рис. 1.

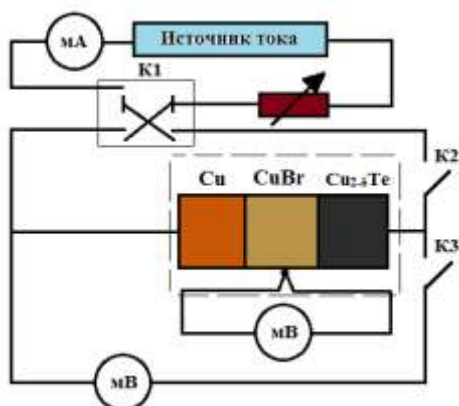


Рис. 1. Схема электрохимической ячейки

Согласно Вагнеру [1], выражение для ЭДС данной электрохимической ячейки может быть записано в виде: $E = \frac{1}{e}(\mu_{Cu}^{Cu} - \mu_{Cu})$, т.е. разность химических потенциалов меди μ_{Cu}^{Cu} в металлической меди и меди μ_{Cu} в насыщенном растворе $Cu_{2-\delta}Te$ уравнивается равной ей по величине и противоположной по направлению разностью электростатических потенциалов, которая и представляет собой ЭДС электрохимической ячейки или свободную энергию образования.

Тогда для термодинамических функций – энтропии S и энтальпии H , с учётом

$$\left[e \frac{\partial E}{\partial T} \right]_{\delta} = \left[\frac{\partial \mu_{Cu}}{\partial T} - \frac{\partial \mu_{Cu}}{\partial T} \right]_{\delta} \quad (1)$$

справедливы следующие соотношения:

$$\mu = H - TS, \text{ где } S = - \left[\frac{\partial \mu}{\partial T} \right]_{\delta}, \quad H = \mu + T \left[\frac{\partial \mu}{\partial T} \right]_{\delta} \quad (2)$$

На рис. 2 представлены экспериментально полученные зависимости изменения энтропии от состава для теллурида меди в интервале температуры от 590 до 680 К.

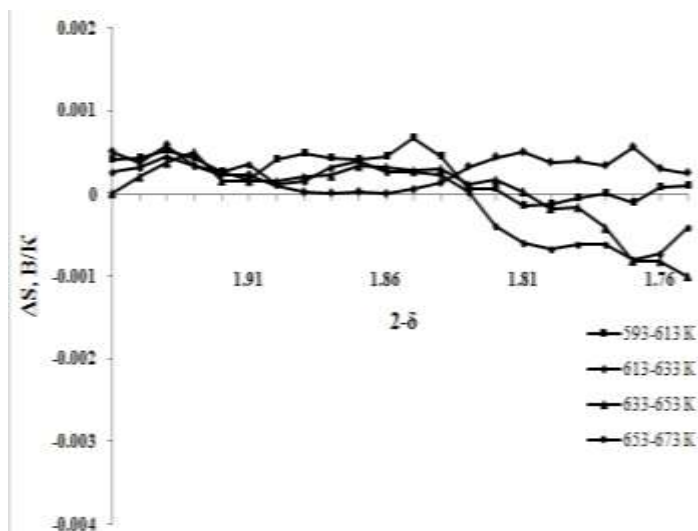


Рис. 2. Зависимости изменения энтропии в $\text{Cu}_{2-\delta}\text{Te}$ от состава

Как следует из зависимостей (рис. 2), в интервале температур 593–673 К изменение энтропии системы имеет положительный знак для составов $\delta = 0,04$ – $0,19$ и отрицательный знак для составов $\delta = 0,19$ – $0,25$.

Нехарактерное для суперионных проводников изменение энтропии наблюдается в диапазоне 613–633 К. В интервале температур 593–633 К для всех составов характерен эндотермический эффект, в интервале 633–673 К для состава $\delta = 0,19$ – $0,25$ зависимость ΔH меняет знак (экзотермический эффект).

При защите отчета по работе студентам предлагается самостоятельно предложить возможные объяснения полученных зависимостей, исходя из анализа литературных данных по кристаллической структуре и фазовым переходам в теллуриде меди [1].

Библиографический список

1. Горбачев В.В. Полупроводниковые соединения АІІВVI. М.: Металлургия, 1980. 132 с.
2. Wagner J.B., Wagner C. Investigations on Cuprous Sulfide // J. Chem. Phys. 1957. V. 26, № 6. P. 1602–1605.

Сведения об авторах

Ягафарова Зульфия Абдулхаевна, кандидат физико-математических наук, доцент СФ Баш ГУ (Стерлитамак), E-mail: zulfiya_abdul@mail.ru.

Секция 5
«ПРОБЛЕМЫ ОБУЧЕНИЯ В СОВРЕМЕННОМ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОМ ПРОСТРАНСТВЕ»

УДК 537.61; 537.62; 53.082.7

Иванов М.В., Галиев Р.Д., Хатмуллина М.Т.

ПОСТАНОВКА ЛЕКЦИОННОЙ ДЕМОСТРАЦИИ
«ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ФЕРРОМАГНЕТИКА»

В статье рассматривается постановка лекционной демонстрации при изучении раздела «электричество-магнетизм» на кафедре физики УГАТУ силами студентов. В качестве образца взят сердечник ферромагнитный 2000 НМС. Демонстрация позволяет наблюдать явление гистерезиса и фазовый переход второго рода.

Ключевые слова: петля гистерезиса, ферромагнетик, температура Кюри, магнитная проницаемость, магнитная индукция, напряженность поля, фазовый переход.

Ivanov M. V., Galiev R.D., Khatmullina M.T.

RESEARCH OF THE PROPERTIES OF A FERROMAGNET
AND THE CURIE TEMPERATURE

The article deals with the behavior of a ferromagnetic core 2000 HMC on the influence of an external electric field on it and the measurement of the Curie temperature using an experimental installation ФДЭ-001М and oscilloscope.

Keywords: hysteresis loop, ferromagnet, impact, temperature, change, dependence graph, oscilloscope, installation

Одной из непростых для понимания тем при изучении магнитного поля в веществе в курсе физики технического вуза является изучение свойств ферромагнетика [1-2]. Лекционная демонстрация по этой теме позволит студентам легче понимать и визуализировать сложные моменты теории. Демонстрация состоит из двух частей. В первой части исследуется явление гистерезиса, во второй части определяется температура Кюри по мере охлаждения нагретого ферромагнетика.

Экспериментальная установка ФДЭ001М

Установка выполнена в настольном исполнении. На диэлектрическом основании 1 на стойке с подставкой 2 закреплен сердечник 5 из электротехнической стали. На сердечнике установлены две катушки 9 (первичная и вторичная обмотки трансформатора), в которые установлен демонстрируемый сердечник 10. При помощи стоек 6, прижимной планки 8 и винтов 7 демонстрируемые сердечники прижимаются к стационарному сердечнику 5. На основании при помощи пружинных фиксаторов 3 размещены сердечники 4 из других материалов.

На стойке 14 закреплен трансформатор с ферромагнитным сердечником 15. Под сердечником, при помощи фиксирующего кольца 12 можно изменять расстояние между сердечником и держателем сухого горючего, в зависимости от высоты пламени.

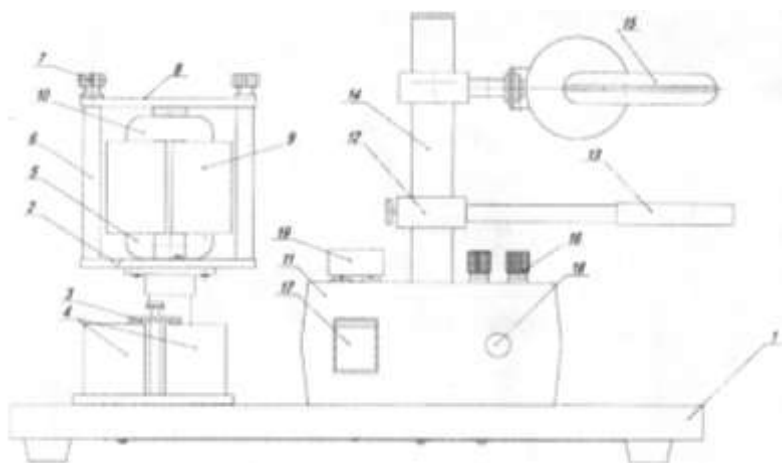


Рис. 1. Блок-схема установки ФДЭ001М

Питание и управление режимами работы осуществляется при помощи блока коммутации 11. На передней панели блока находятся сетевой выключатель 17 и ручка 18, позволяющая изменять вид петли гистерезиса. На верхней панели блока находится переключатель режимов работы 19 (ТОЧКА КЮРИ – ПЕТЛЯ ГИСТЕРЕЗИСА) и клем-

мы и гнезда, для подключения амперметра, разверток осциллографа X и Y, вольтметра и ЛАТРА.

Параметры установки: $R_1=10\text{Om}$, $R_2=39\text{KOm}$, $N_1=2140$, $N_2=45$, $S=0.00024\text{m}^2$, $l=0.035\text{m}$, $C=3.3\mu\text{F}$.

Поведение ферромагнетика во внешнем переменном магнитном поле.

При увеличении напряжения U потенциометром R , увеличивается амплитуда колебаний H , при этом на экране демонстрируется последовательный ряд различных по своей площади петель гистерезиса. Верхняя точка петли гистерезиса находится на кривой $B=B(H)$.

Величины магнитной индукции B и напряженности поля H вычисляются следующим образом:

$$H = \frac{N_1 u_x n_x}{l R_1}; B = \frac{R_2 C u_y n_y}{N_2 S}, \quad (1)$$

где координаты n_x и n_y вершины петель, u_x и u_y – напряжения вызывающее отклонение электронного луча на одно деление в направлении осей X и Y соответственно.

Вычисляется магнитная проницаемость μ :

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H} \quad (2)$$

Намагниченность J образца:

$$J = (\mu - 1)H \quad (3)$$

Были построены зависимости магнитной индукции от напряженности внешнего магнитного поля (рис. 2), кривая намагничивания (рис. 3), зависимость магнитной проницаемости от напряженности поля (рис. 4).

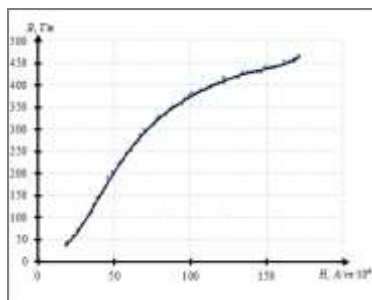


Рис. 2. Зависимость индукции магнитного поля от напряженности для исследуемого образца

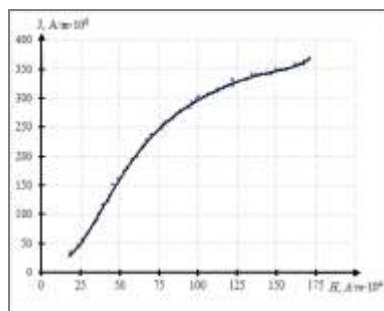


Рис. 3. Основная кривая намагничивания ферромагнетика

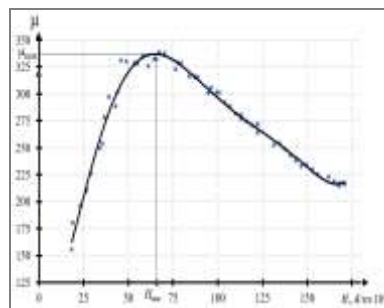


Рис. 4. Кривая зависимости магнитной проницаемости от напряженности внешнего поля

Магнитная проницаемость достигает максимального значения $\mu = 338$ при $H_{нас} = 672500 \text{ A/m}$.

Измерение температуры Кюри

Температуру Кюри можно определить по температурной зависимости намагниченности, применяя для этого экстраполяцию крутой части зависимости магнитной проницаемости к оси температур. Чтобы измерения были достоверными, ферромагнетик нагревается до температуры, при которой происходит фазовый переход II рода. На экране осциллографа петля гистерезиса вырождается в прямую. После этого с помощью термпары измеряется температура в обратном направлении, до восстановления образца в ферромагнетик. В ходе остывания образца аудитория может наблюдать как постепенно восстанавливается форма петли гистерезиса.

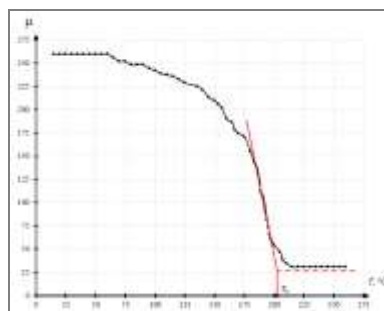


Рис. 5. График зависимости магнитной проницаемости исследуемого образца от температуры

Строится зависимость магнитной проницаемости от напряженности внешнего поля (рис. 5). Несмотря на крутизну характеристики в окрестности точки Кюри (T_K), магнитный материал не переходит точку Кюри скачкообразно: переход происходит постепенно, начиная с поверхности. При этом материал заготовки становится словно двухслойным: слой парамагнетика поверх слоя ферромагнетика с достаточно резкой границей раздела сред. Это объясняется неравномерностью нагрева заготовки в поперечном сечении и сильно зависит от интенсивности проявления поверхностного эффекта.

Магнитные свойства образца меняются: переход ферромагнетика в парамагнетик сопровождается уменьшением величины магнитной проницаемости μ .

Точки Кюри определяется по зависимости магнитной проницаемости от температуры. Измерения проводились в интервале температур от 15°C до 260°C . По графику можно сделать вывод, что для исследуемого образца $T_K = 202 \pm 2^\circ\text{C}$.

Заключение

В данной статье были описаны свойства ферромагнетиков и явление фазового перехода второго рода. Для определения некоторых свойств ферромагнетика проведен первый опыт, в котором демонстрируется зависимость формы петли гистерезиса от амплитуды напряженности магнитного поля. Для выяснения температуры Кюри был проведен второй опыт, в котором демонстрируется зависимость магнитной проницаемости от температуры. Все вышеприведенные зависимости, показанные на графиках, предполагаются быть выведенными на экран.

В работе представлены экспериментальные результаты измерений температуры Кюри сердечника ферромагнитного 2000 НМС. Плавное изменение формы петли гистерезиса и ее вырождение в линию, при изменении температуры ферромагнетика, позволяет зафиксировать температуру Кюри.

Библиографический список

1. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. М.: Издательский центр «Академия». 2014. 720 с.
2. Трофимова Т. И., Курс физики. М.: Издательский центр «Академия». 2014. 558 с.

Сведения об авторах

Иванов Михаил Валерьевич, студент УГАТУ (Уфа). E-mail: miha192002@mail.ru.

Галиев Рамиль Дамирович, студент УГАТУ (Уфа). E-mail: ramagaliev@yandex.ru.

Хатмуллина Маргарита Талгатовна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики УГАТУ (Уфа). E-mail: khatmullinamt@mail.ru.

УДК 378

Конопля В.М., Филякова О.В.

КОМПЕТЕНТНОСТНЫЙ И ДЕЯТЕЛЬНОСТНЫЙ ПОДХОД В ОБРАЗОВАНИИ

В статье рассматривается идея компетентностно-деятельностного подхода в профессиональной подготовке, предполагающего не только изменение содержания, форм и методов учебной деятельности учащихся, но и преобразование деятельности преподавателя, ориентированного на выработку у учащихся опыта креативной самоактуализации.

Ключевые слова: профессиональная компетентность, профессиональная деятельность, педагогические технологии.

Konoplya V.M., Filyakova O.V.

COMPETENCE AND ACTIVITY APPROACH IN EDUCATION

The article discusses the idea of a competence-activity approach in vocational training, which involves not only changing the content, forms and methods of students educational activities, but also transforming the teachers activities, focused on developing students experience of creative self-actualization.

Key words: professional competence, professional activity, pedagogical technologies.

В соответствии с основными положениями Государственного образовательного стандарта образования Республики Казахстан предусматривающего перехода на 12 летнее образование, система образования призвана обеспечить становление «компетентностной» личности, готовой к эффективному участию в социальной, экономической, политической жизни Республики Казахстан». Достижение соответствующих результатов, включающих в себя три ключевые компетентности: компетентность разрешения проблем, информационную компетентность, коммуникативную компетентность.

Эта стратегия нацелена на перспективное развитие системы образования, решить которую предстоит посредством педагогических и информационных технологий. Для этого, важно, и необходимо осознать, что в век информационных технологий в постиндустриальный период развития человек сталкивается с лавинообразным потоком информации. [3]

Уже сегодня человеку нужно осознать необходимость получения не просто образования, а образования, соответствующего требованиям времени. Все это является приоритетным направлением непрерывного образования. При подобном рассмотрении перспектив развития образования оказывается недостаточным ориентироваться на необходимость передачи и усвоения опыта, накопленного человечеством. Важно умение самостоятельно приобретать знания, уметь работать с информацией, анализировать ее. Не просто усвоение знаний, а умение их творческого применения, развитие самостоятельного критического мышления школьника становится важным. Другими словами, задачи, многие годы выдвигавшиеся учеными-педагогами, приобрели особую актуальность. Их реализация требует принципиально иного взгляда, как на технологию обучения, так и на теорию. Речь идет о необходимости развития личности, а не среднего ученика. Следова-

тельно, приоритет должен быть за личностно-ориентированной педагогикой, личностно-ориентированными педагогическими технологиями. Таким образом, стратегические направления развития образовательных систем в современном обществе очевидны: интеллектуальное и нравственное развитие человека на основе вовлечения его в разнообразную самостоятельную целесообразную деятельность в различных областях знаний. [1]

Весьма полезно определиться со средствами, которые будут способствовать успешному решению и внедрению новых педагогических, информационных технологий обучения и роли ученика в нем, от пассивного «получателя» знаний, умений и навыков к активному субъекту познавательного процесса. Если говорить о педагогических технологиях, то следует говорить о таких, которые были бы по своим функциям адекватны специфике личностно-ориентированного, гуманистического подхода. Предпочтительнее такие технологии, как обучение в сотрудничестве, технология «Дебаты», технология современного проектного обучения, технология модульного обучения, интерактивные технологии, игровые технологии, технологии программированного обучения.

Особое внимание в настоящее время уделяют технологии проектного обучения. Идея проектного обучения принадлежит англичанину Д.Дьюи. Реализовал в педагогической практике технологию проектного обучения С.Т.Шацкий со своими соратниками, начав эту работу в 1905 году. Метод проектов предполагает определенный путь достижения результата. [4]

Учебный творческий проект – это самостоятельно разработанный и изготовленный продукт от идеи до ее воплощения, обладающий субъективной или объективной новизной, выполненный под контролем и при консультации учителя. Характерной особенностью проектной технологии является наличие значимой или личной проблемы ученика, которую учащиеся решают совместной творческой, исследовательской поисковой или игровой деятельностью в зависимости от типа проекта. Проект требует интегрированного знания, исследовательского поиска решений проектной деятельности. Среди учебных проектов можно выделить следующие типы: исследовательские, творческие, информационные, социально-значимые, телекоммуникационные.

В проектной обучающей технологии существуют методы кейсов. Метод кейсов разработан Гарвардским университетом – это обучение

с помощью анализа конкретных ситуаций на основе фактов реальной жизни. Различают следующие виды кейсов: ситуации-иллюстрации, ситуации-упражнения, ситуации-оценки, ситуации-проблемы. Очень популярными являются кейсы, обучающие решению проблем и принятию решений. Кейсы готовят на базе «полевых» исследований или «обобщенного» опыта. Кейс–метод позволяет установить оптимальное сочетание теоретических и практических аспектов обучения. Наиболее распространенными в западных школах являются кейсы, иллюстрирующие проблему, решение или концепцию в целом. Именно с них начинали использовать кейсы многие преподаватели бизнес-дисциплин. Метод case study развивает следующие компетентностные качества личности: аналитические умения, практические умения, творческие умения, коммуникативные умения, социальные умения.

Основные требования к использованию метода проектов можно сформировать кратко следующим образом:

- наличие значимой в исследовательском творческом плане проблемы, задачи, требующей интегрированного знания, исследовательского поиска для ее решения (например: исследование демографической проблемы в разных регионах мира, создание серии репортажей из разных концов земного шара по одной проблеме, проблема кислотных дождей, влияющих на окружающую среду и т.д.)

- практическая, теоретическая, познавательная значимость предполагаемых результатов: (например: доклад в соответствующие службы о демографическом состоянии данного региона, о факторах, влияющих на это состояние, тенденциях, выпуск газеты, альманах с репортажами с места событий: охрана леса в разных местностях, план мероприятий и т.д.)

- самостоятельная (индивидуальная, парная, групповая) деятельность учащихся

- структурирование содержательной части проекта (с указанием поэтапных результатов)

- развитие способности применять знания к жизненным ситуациям

- использование исследовательских методов, определение проблемы, вытекающих из нее задач исследования, оформление конечных результатов, анализ полученных данных, моделирование, подведение итогов, корректировка, выводы

- развитие новейших компетенций для современной жизни [5]

Говоря о новых информационных технологиях, необходимо остановиться на возможностях, которые несут в себе телекоммуникаци-

онные технологии. Речь идет о глобальных телекоммуникациях, которые помогают распахнуть окна в широкий мир, организовать диалог культур, создают предпосылки условия для подлинной интеграции образовательных систем, формируют единое образовательное информационное пространство с использованием глобальной сети Интернет, пониманием реальных очертаний исследуемых проблем. Учащиеся имеют доступ к различным информационным банкам данных во всех уголках мира, могут работать совместно над интересующими их проектами с учащимися из других стран, в рамках телеконференций обсуждать проблемы практически со всем миром. С помощью глобальных сетей преодолеваются границы, человек входит в единое образовательное пространство, совместная работа стимулирует учащихся на ознакомление с разными точками зрения на изучаемую проблему, на поиск дополнительной информации, на оценку полученных собственных результатов. Обсуждение промежуточных результатов в классе, дискуссии, доклады, рефераты обретают иное качество, поскольку они содержат не только материал учебников и официальных справочников, но и точку зрения партнеров по проекту из других регионов мира, получаемые ими данные, их интеграцию различных фактов, явлений. Телекоммуникации (электронная почта, телеконференции, в том числе аудио и видео конференции) позволяют учащимся самостоятельно формировать свой взгляд на происходящие в мире события, осознавать многие явления и исследовать их с разных точек зрения, наконец, понять, что некоторые из проблем могут быть решены только совместными усилиями. Это и есть элементы глобального мышления. Это путь к познанию общности человеческого бытия и эволюции развития. [2]

Поставленная задача обучения и воспитания компетентностной активной и самостоятельной личности, действующей в условиях избытка информации, требует другой позиции педагога: учителя способного уже сейчас в школе создать возможности для приобретения учащимися опыта осуществления деятельности в контексте решения реальных личностно-значимых проблем. А также будет служить залогом успешной социализации самореализации современной личности, так как образовательная компетенция моделирует деятельность ученика для его полноценной жизни в будущем.

Библиографический список

1. Бочарова В.Г. Социально-воспитательные технологии. М., 2002. С.10-12.

2. Елизаров А.В. Электронная трибуна, электронный научно-педагогический журнал «Эйдос». М., 2000.

3. Полат Е.С. Новейшие средства информационной технологии в системе образования. М., 1990. С. 5-8.

4. Имжарова З.У., Рахимбаев М.М. Обучение для будущего. Астана, 2009. С. 6-8.

5. Роберт И.В. Современные информационные технологии в образовании: дидактические проблемы, перспективы использования. М., 1994. С. 2-4.

6. Селевко Г.К. Педагогические технологии на основе активации, интенсификации и эффективного управления. УВП. М., 2005. С. 3-7.

Сведения об авторах

Конопля Валентина Михайловна, учитель биологии, КГУ «Средняя школа-гимназия № 9», Казахстан, г. Актобе. E-mail: koporlya_00@inbox.ru.

Филякова Ольга Васильевна, учитель физики, КГУ «Средняя школа-гимназия № 9», Казахстан, г.Актобе. E-mail: olka_10@inbox.ru.

УДК 548.314; 538.955

Короткова Л.А.

ДИДАКТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ МОТИВАЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ СТУДЕНТОВ В УСЛОВИЯХ КРЕДИТНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ОБУЧЕНИЯ

В этой статье рассматриваются новые инновационные формы и условия обучения, требующие существенного повышения качества подготовки специалистов в ВУЗе.

Ключевые слова: скоординированное решение, кредитная система, инновационные формы.

Korotkova L.A.

DIDACTIC BASES OF INCREASING STUDENTS ' MOTIVATIONAL ACTIVITY IN THE CONDITIONS OF CREDIT TECHNOLOGY OF EDUCATION.

This article discusses new innovative forms and conditions of training that require a significant improvement in the quality of training of specialists at the university.

Keywords: coordinated solution, credit system, innovative forms.

При переходе на кредитную систему обучения одной из важнейших проблем является решение фактора мотивационной деятельности студентов в процессе кредитной технологии обучения, именно в практике преподавания телерадиовещания. Это вполне объяснимо, ибо проблема мотивации, связанная с исследованием причин, побуждающих на поступки в различных формах человеческой деятельности, являются центральными в преподавании радиоэлектроники, телерадиовещания.

Проблема мотивации педагогической деятельности является одной из наиболее сложных и мало разработанных тем в современных условиях совершенствования и развития педагогического процесса в Республике Узбекистан. Практически нет специальных исследований, в которых бы прослеживалась мотивационная деятельность студентов особенно в условиях кредитной системы обучения. Новые инновационные формы и условия обучения требуют существенного повышения качества подготовки специалистов по различным направлениям профессиональной деятельности, необходимость продолжить реформирование системы высшего профессионального образования в Узбекистане.

Отличительной особенностью кредитной системы обучения является ее направление на глубокое освоение полученных знаний и развитие элементов творчества и критически осмысленного подхода в деятельности студентов. Кредитная система обучения предоставила вузам, профессорско-преподавательскому составу и особенно студентам самостоятельность, изменился подход к преподаванию учебных дисциплин, выбора элективных курсов, повысилась эффективность усвоения теоретических и практических знаний путём развития у студентов навыков самостоятельной работы. Это позволяет студентам ориентироваться на изучение наиболее нужных и важных дисциплин с точки зрения будущей избранной специальности.

В кредитной системе обучения за счёт сокращения аудиторных занятий значительно увеличивается объём самостоятельной работы студентов. Меняется роль преподавателя как наставника и координатора самостоятельной и творческой деятельности студентов. Возрастают функции преподавателя в постоянной организации лекций, консультаций и учебно-методических рекомендаций для качественного выполнения индивидуальных работ студентов по каждому занятию.

Для достижения главных и основных целей приобретения знаний преподавателю необходимо иметь комплекс учебно-методических работ, дидактические материалы и средства, чтобы организовать эффективную самостоятельную работу студентов на высоком уровне по освоению всей программы учебного курса.

Как показывает опыт, в настоящее время вузы Узбекистана, проводя эксперименты по внедрению кредитной системы обучения, имеют разные взгляды и подходы в её осуществлении.

Таким образом, скоординированное решение насущных проблем образования и интеграционное взаимодействие вузов стран СНГ, в первую очередь, Российской Федерации и стран Центральной Азии, в том числе Республики Узбекистан, на мой взгляд, является важным фактором совершенствования деятельности вузов и их активное участие в Болонском процессе, более высокому уровню качества высшего профессионального образования.

Наблюдения подтверждают, что преподаватели, в основном, работают со студентами только с внешней, формальной стороны (характеристики) их поведения, не вдаваясь и не раскрывая их внутреннего содержания. А неумение проникнуть во внутреннее содержание действий и поступков (т.е. в мотивы его действий и внутреннее отношение к задачам, которые ставятся перед ним) дает отрицательные результаты.

В современных условиях образования, по моему глубокому убеждению, необходимо:

- создать условия, способствующие гармоничному развитию личности;
- обеспечить преподавателя необходимым учебным арсеналом педагогических средств и воздействий, обеспечивающих успешность развития мотивации к обучению, что является актуальным именно в современных условиях реформирования системы образования, в частности, в условиях реализации кредитной технологии обучения.

Таким образом, существующие противоречия, а также возрастающая актуальность, теоретическая и практическая значимость, недостаточная разработанность социально-педагогических технологий формирования мотивационной деятельности студентов определило эту статью.

Библиографический список

1. Умарова Б.Х. Из опыта внедрения информационно-педагогических технологий при обучении русскому языку [Текст] / Б.Х. Умарова // Известия Академии Наук Республики Таджикистан. Серия гуманитарных наук. – Душанбе, 2010. – № 3. С. 46-50. – ISSN 2076-2569.
2. Абдулина О.А. Общепедагогическая подготовка учителя в системе высшего педагогического образования: Для спец. вузов. 2-е изд., М.: Просвещение, 1989. – 139 с.
3. Абылкасымова А.Е. об особенностях подготовки преподавателей в университете // Вестник высшей школы Казахстана. 1995. – № I. С. 55-58.
4. Агеев В.В. Введение в психологию человеческой уникальности. – Томск, 2002. – 428 с.

Сведения об авторах

Короткова Лариса Александровна, старший преподаватель ТГТУ (Ташкент) E-mail: Korotkova.larisa1967@mail.ru.

УДК 378

Кузин Е.Б., Медведев Р.Е.

ПРИМЕНЕНИЕ ДИСТАНЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ОБУЧЕНИЯ В ОБРАЗОВАТЕЛЬНОМ ПРОЦЕССЕ АКАДЕМИИ ФСИН РОССИИ В УСЛОВИЯХ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ КОРОНАВИРУСНОЙ ИНФЕКЦИИ (COVID-19)

В статье приводится краткий обзор применения информационных технологий в образовательном процессе Академии ФСИН России в условиях предупреждения распространения коронавирусной инфекции, рассматриваются вопросы применения программного обеспе-

ния с использованием дистанционных технологий в режиме видеоконференцсвязи.

Ключевые слова: дистанционные технологии обучения, электронно-образовательная среда, видеоконференцсвязь.

Kuzin E.B., Medvedev R.E.

**THE USE OF DISTANCE LEARNING TECHNOLOGIES IN THE
EDUCATIONAL PROCESS OF THE ACADEMY OF THE
FEDERAL PENITENTIARY SERVICE OF RUSSIA IN THE
CONTEXT OF PREVENTING THE SPREAD OF CORONAVIRUS
INFECTION (COVID-19)**

The article provides a brief overview of the use of information technologies in the educational process of the Academy of the Federal Penitentiary Service of Russia in the context of preventing the spread of coronavirus infection. It discusses the effectiveness of applying remote control software in the video conferencing mode.

Keywords: distance learning technologies, electronic information-and-educational environment, video conferencing.

В Академии ФСИН России проводится работа по дальнейшему внедрению в образовательный процесс современных информационных технологий, интерактивных методов и инновационных методик обучения, в том числе по эффективной организации образовательного процесса и качественному применению технологий дистанционного обучения.

В условиях современного информационно-технического прогресса образовательная среда высшего учебного заведения представляет собой компьютерные сети, информационные и, коммуникативные технологии, информационно-образовательный контент, доступный с рабочей станции локальной сети или гаджета, и, конечно, профессорско-преподавательский состав, внедряющий эти информационные технологии.

Основой образовательного процесса с активным использованием средств дистанционного обучения является электронно-образовательная среда Академии ФСИН России (<http://lms.apu-fsin.ru>), реализованная на системе управления обучением Moodle (Learning Management System Moodle).

Moodle (или система управления учебным контентом) по своей структуре является модульной объектно-ориентированной учебной средой. Данный свободно распространяемый программный продукт

направлен прежде всего на организацию взаимодействия между всеми участниками образовательного процесса в рамках осуществления педагогической деятельности сотрудниками высшего учебного заведения.

Богатая функционалом и абсолютно бесплатная система управления учебным контентом Moodle позволяет организовать самостоятельную работу курсантов юридического, экономического, психологического факультетов и студентов Института Академии ФСИН России на качественно новом уровне. Особенно актуальна данная задача при организации образовательного процесса у слушателей курсов факультета повышения квалификации, высших академических курсов академии.

Структуру электронного учебного курса в Moodle разрабатывает непосредственно преподаватель, закрепленный за курсом, при этом содержание курса должно удовлетворять требованиям федеральных государственных образовательных стандартов высшего образования и соответствовать содержанию утвержденной рабочей программы учебной дисциплины. Функционал системы позволяет в качестве наполнения электронных курсов использовать большое количество разнообразных элементов, к числу которых относятся: вспомогательные файлы различных форматов (в том числе презентации), текстовые массивы различного содержания и объема, тестирования различной сложности, глубины и способов проведения. За семь лет эксплуатации Moodle созданы и используются электронные курсы по всем направлениям учебного процесса Академии ФСИН России.

В 2019/20 учебном году главной проблемой в организации образовательного процесса академии в условиях предупреждения распространения коронавирусной инфекции стал перевод академии на дистанционный вид работы [1]. Однако решение для проведения государственной итоговой аттестации, различного рода экзаменов и занятий с использованием дистанционных технологий было найдено.

В соответствии с письмом ФСИН России от 15 мая 2020 г. исх. №-02-29714 образовательным организациям необходимо было организовать работу по проведению занятий лекционного типа в режиме видеоконференцсвязи (вебинаров). Учебным отделом академии был произведен расчет объемов проведения занятий и аттестационных испытаний в режиме видеоконференцсвязи во II полугодии 2019/20 учебного года.

Так, в соответствии с нормативной документацией, организующей образовательный процесс Академии ФСИН России в 2019/20 учебном году, в период со 2 июня 2020 г. по 31 июля 2020 г. было запланировано:

- проведение процедуры государственной итоговой аттестации обучающихся очной формы обучения академии и института (61 аттестационное испытание (сдача государственного экзамена и защита ВКР) в период со 2 июня 2020 г. по 26 июня 2020 г.);
- проведение промежуточной аттестации по результатам обучения во II полугодии 2019/20 учебного года у обучающихся очной формы обучения академии и института (315 аттестационных испытаний в период с 15 июня 2020 г. по 31 июля 2020 г.).

Таким образом, в период со 2 июня 2020 г. по 31 июля 2020 г. было проведено 376 экзаменов.

Сотрудниками информационно-технического отдела академии был проработан вопрос технического сопровождения проведения занятий, промежуточной аттестации с использованием дистанционных технологий:

- в тесном взаимодействии с ООО «Труконф» была получена бесплатная лицензия на проведение видеоконференцсвязи сроком до 26 мая 2020 г., а также развернуто три бесплатных сервера программного обеспечения «Труконф». До 26 июня 2020 г. на базе серверного оборудования Академии ФСИН России возможно было проводить одновременно 6 экзаменов (одновременное подключение на один экзамен – 1 преподаватель и 5 курсантов, студентов, слушателей), после 26 июня 2020 г. возможно проведение 4 экзаменов с тем же составом. Система управления учебным контентом Moodle в соответствии с действующими нормами зарегистрирована в едином реестре российских программ для электронных вычислительных машин и баз данных (<https://reestr.digital.gov.ru/>).

Стоимость закупки программного обеспечения «Труконф» для одновременной работы 200 человек составляет 30 000 рублей в месяц. В режиме пробной эксплуатации возникли технические проблемы: данное программное обеспечение размещается на серверном оборудовании Академии ФСИН России, технические характеристики которого не предназначены для такого потока видео. Необходима аренда серверного оборудования у сторонней организации. Приблизительная стоимость аренды – 25 000 рублей, незапланированное финансирование по этой статье расходов не представляется возможным;

- лекции профессорско-преподавательского состава академии весной 2020 года проводились с помощью программного обеспечения «Zoom» (количество подключений – до 100 человек на одну конференцию). Данное программное обеспечение является бесплатным, длительность конференции – 40 минут, но по истечении данного времени необходимо создавать новую конференцию и высылать ее номер всем участникам конференции. Платная версия лишена данного недостатка, но закупка невозможна [2], так как данное программное обеспечение не является отечественным программным продуктом и видеосерверы находятся за границей.

В настоящий момент используются бесплатные версии программного обеспечения для проведения видеоконференций на платформе Mail.ru Group в составе своего почтового сервиса – «Видеозвонки Mail.ru». Видеозвонки можно использовать, чтобы проводить онлайн-уроки, совещания в компании, вебинары. В одном чате могут участвовать до 100 человек без ограничения по времени. Имеется возможность делиться экраном, показывать презентации.

Для проведения занятий лекционного типа в режиме видеоконференцсвязи (вебинаров) были осуществлены организационно-технические мероприятия:

- разработана инструкция для профессорско-преподавательского состава по проведению видеоконференцсвязи (вебинаров) с мест проживания с использованием дистанционных технологий;
- организованы рабочие места с использованием закрепленных за факультетом, кафедрой ноутбуков и другой компьютерной техники, позволяющей проведение видеоконференцсвязи (вебинаров) преподавателями, не имеющими технической возможности работать дистанционно.

Передача потокового видео на расстоянии или видеоконференцсвязь предусматривает применение современных информационно-коммуникационных средств, позволяющих всем участникам образовательного процесса синхронно, в режиме реального времени взаимодействовать друг с другом посредством передачи аудио- и видеoinформации. Она реализуется двумя видами – аппаратным и программным.

Лекции, телемосты, содержащие сведения ограниченного пространства, для слушателей высших академических курсов и факультета повышения квалификации и первоначальной подготовки сотрудников ФСИН России разных категорий проводятся с помощью

аппаратной системы видеоконференцсвязи (системы видеосвязи LifeSize) по ведомственной сети передачи данных ФСИН России.

Одним из нововведений является одновременное чтение лекций профессорско-преподавательским составом курсантам Академии ФСИН России и Псковского филиала академии с использованием системы видеоконференцсвязи. В 2019/20 учебном году было проведено более 180 сеансов видеоконференций, телемостов в соответствии с расписанием, утвержденным ФСИН России, образовательными организациями и территориальными органами ФСИН России.

Библиографический список

1. МР 3.1/2.1.0205-20. 3.1. Профилактика инфекционных болезней. 2.1. Коммунальная гигиена. Рекомендации по профилактике новой коронавирусной инфекции (COVID-19) в образовательных организациях высшего образования: метод. рек.: утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 29 июля 2020 г. [URL: https://consultant.ru](https://consultant.ru) (дата обращения: 15.05.2021).

2. Об утверждении плана-графика перехода на период 2017–2018 годов и на плановый период до 2020 года Федеральной службы исполнения наказаний на использование отечественного офисного программного обеспечения: распоряжение ФСИН России от 18 декабря 2017 г. № 335-р. URL: <https://consultant.ru> (дата обращения: 15.05.2021).

Сведения об авторах

Кузин Евгений Борисович, преподаватель кафедры математики и информационных технологий управления экономического факультета Академии ФСИН России (Рязань). E-mail: kuzin200654@mail.ru.

Медведев Роман Евгеньевич, кандидат технических наук, начальник отделения учебного отдела Академии ФСИН России (Рязань). E-mail: roman_medvedev@inbox.ru.

С ЧЕГО НАЧИНАЕТСЯ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ?

В статье раскрыт смысл действий, которые необходимо выполнить в начале работы над задачей. На примерах показано, как замена информации по эквивалентности позволяет понять задачу и свести решение исходной к стандартной.

Ключевые слова: задача, решение задачи, понимание задачи, замена информации по эквивалентности.

Mikhaylov P.N., Mikhaylova V.V.

HOW DOES THE SOLUTION OF THE PROBLEM BEGIN?

The article reveals the meaning of the actions that must be performed at the beginning of work on the task. The examples show how the replacement of information by equivalence makes it possible to understand the problem and reduce the solution of the original to the standard one.

Keywords: problem, solution of the problem, understanding of the problem, replacement of information by equivalence.

Знакомство с действующими учебниками по методике преподавания математики и физики в пединститутах и обзор литературы, посвященных методике обучения школьников и студентов обучению задач, создают у читателя устойчивое представление о том, что в методической литературе давно выяснено с чего начинается решение задач. Но почему тогда учащиеся при решении достаточно простых, нестандартных задач не могут приступить к ее решению?

Как правило, авторы [1, 2, 3] предлагают разбить решение задач на этапы, а затем обучать, как их реализовать. Первый этап – анализ задачи. В курсах методики здесь указывают, необходимо выделить что дано, что нужно найти и т.п. В книге Пойа [4] первая эвристика формулируется так: необходимо понять задачу. И в целом другие авторы согласны с этим. Но в известных пособиях нет ответов на вопросы, а что значит «понять задачу?» и «что нужно сделать, чтобы понять ее?»

На первый взгляд, кажется, ответы на эти вопросы достаточно просты и очевидны. Так в психологическом словаре [5] читаем: «По-

нимание – способность постичь смысл и значение чего-либо и достигнутый благодаря этому результат. Для понимания характерно ощущение ясной внутренней связности, организованности рассматриваемых явлений» (С. 250). Это определение обладает существенным недостатком: оно не содержит средственного критерия понимания. Смысл понятия всесторонне раскрыт в 450 страничной монографии Знакова В.В. [6], посвященной психологии понимания.

Представив задачу для решения учащимся учителя часто спрашивают: Вы поняли задачу?» и, оценивая, иногда говорят: «Вы недостаточно понимаете». Чем мы руководствуемся, когда сравнивая ответы, оцениваем, кто лучше понимает, а кто хуже?

Почему, например, мы можем сказать, что понимаем, что такое квадрат. Видимо только потому, что можем его определить многими способами. И чем больше таких способов мы знаем, тем лучше мы понимаем. Такое толкование термина приобретает критериальность и даже количественную характеристику. В качестве рабочего примем следующее, созвучное с одним из определений [6]: мы говорим о чем-то, что понимаем только в том случае, если это что-то мы можем объяснить многими способами и чем большим способом мы можем это сказать, тем лучше понимаем. Заметим, объясняя понятие или отношение, входящее в задачу, новым способом каждый раз мы не меняем задачу, а получаем задачу, эквивалентную первоначальной. Поэтому выполняемую процедуру назовем заменой информации на эквивалентную. Очевидно, что указанная процедура важна как при решении задач физики, так и математики независимо от изучаемых разделов.

Итак, если в задаче какую-либо часть информации заменить другой, равносильной ей, то получится некоторая новая вспомогательная задача. При подходящем выборе способа замены новая задача может быть решена легче исходной. Отсюда, используя равносильность, нетрудно получить решение данной задачи. В этом и заключается процедура, которую необходимо освоить учащимся, чтобы они не терялись в работе над задачами.

Примерами такой замены являются различные формулировки законов сохранения, вывод формулы для решения квадратного уравнения в школьном курсе математики, решение геометрических задач с помощью векторов или с помощью координат и т.п.

Для замены информации из задачи эквивалентной ей могут быть использованы различные сведения и средства. К ним относятся, например:

1 Известные учащимся сведения о равносильности отдельных предложений или видов предложений (равносильность предложений), например, утверждение «Из условия A следует B » равносильно утверждению «Из отрицания B следует отрицание A ».

Большинство из теорем школьного курса математики и физики формулируются как первое утверждение. Равносильность указанных утверждений означает, что у нас всегда есть выбор, доказывать ли само утверждение или равносильное ей. Однако применение такого подхода возможно лишь в старших классах, поскольку в средней школе еще нет обоснования равносильности указанных утверждений.

2. Теоремы о равносильности уравнений или систем уравнений, равносильности параллельности и равенства противоположных сторон четырехугольника и т.п.

3. Выражение одной и той же информации с помощью различных средств (например, словесная, символическая, изобразительная, координатная, векторная и другие формы выражения геометрической информации);

4. Взаимно однозначное соответствие между элементами двух множеств (например, замена умножения положительных чисел сложением их логарифмов);

5. Математическое моделирование практических ситуаций (т.е. выражение в математической форме информации о пространственных формах и количественных отношениях, имеющих место в некоторой практической ситуации).

При решении конкретных задач замена информации на равносильную ей, не всегда четко выделяется. Для ускорения усвоения этого метода рекомендуем после решения каждой из решаемых задач продумать, какая информация, чем была заменена в процессе работы. Особенно на заключительном этапе, при завершении темы, очень эффективны задания по составлению задач с заменой информации.

Рассмотрим несколько примеров задач олимпиадного характера.

Пример 1. Доказать, что если $2^n - 1$ число простое, то число n тоже простое.

Решение. Задача сформулирована, как и большинство теорем школьного курса. По указанию, приведенному в первом пункте, можно решить саму задачу, а можно задачу переформулировать по эквивалентности и решить следующую: Если число n – составное, то $2^n - 1$ тоже составное. Благодаря такой замене, у решающего задачу

есть выбор, решить первую или вторую. Задача во второй формулировке удобна тем, что позволяет использовать некоторые следствия.

Если n – составное, то $n = u \cdot v$, $1 < u < n$. Тогда нетрудно проверить, что $2^n - 1 = (2^u - 1)(2^{u(v-1)} + 2^{u(v-2)} + \dots + 1)$.

И, значит, число $2^n - 1$ – составное.

Пример 2. Один из углов треугольника вдвое больше другого. Докажите, что разность квадратов противолежащих им сторон равна произведению меньшей из этих сторон на третью сторону.

Решение. Построим чертеж, введем обозначения и запишем задачу в алгебраической форме.

Дано: $\triangle ABC$, $\hat{C} = 2\hat{A}$ (для простоты запишем так $C = 2A$).

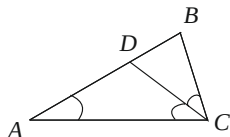
Доказать: $c^2 - a^2 = ab$.

Чтобы облегчить поиск решения задачи, отнесем ее к определенной области школьного курса математики: это геометрическая задача на доказательство, в которой рассматриваются отношения между величинами сторон и углов треугольника. Так актуализируются утверждения, в которых речь идет о связях между сторонами и углами треугольника: в треугольнике против равных углов лежат равные стороны, против большего угла – большая сторона, теорема косинусов, тригонометрические функции, теорема синусов и др.

Анализируя задачу, необходимо понять как условие, так и заключение задачи. Для этого необходимо рассмотреть различные формулировки всей задачи или какой-либо ее части. Здесь это можно сделать по-разному.

1 способ. Например, $C = 2A$ означает, что $A = \frac{1}{2}C$. Геометриче-

ски это значит, что биссектриса угла C делит его на две части, равные A . Тогда $\triangle ABC$ делится биссектрисой CD на два треугольника $\triangle ACD$ и $\triangle BCD$. Таким образом, задача свелась к следующей задаче:



Дано: $\triangle ABC$, CD – биссектриса,
 $\angle BAC = \angle ACD = \angle DCB$.

Доказать: $c^2 - a^2 = ab$.

Заметим, что $\triangle ABC$ и $\triangle CBD$ подобны по двум углам, поэтому $\frac{AB}{CB} = \frac{BC}{BD}$, то есть, $BD = \frac{a^2}{c}$. А так как CD – бис-

сектриса, то $\frac{AC}{CB} = \frac{AD}{BD}$ или $\frac{b}{a} = \frac{c-BD}{BD}$. Подставив сюда значение BD , получим искомое равенство.

2 способ. Перепишем требование задачи в следующем виде: доказать $\frac{c^2}{a^2} - 1 = \frac{b}{a}$. Используя теорему синусов, получим еще одну формулировку задачи.

Дано: $A+B+C=180^\circ$, $C=2A$.

Доказать: $\frac{\sin^2 C}{\sin^2 A} - 1 = \frac{\sin B}{\sin A}$.

Кто любит возиться с тригонометрическими тождествами, может решать эту задачу.

3 способ. Перепишем требование задачи в виде: доказать

$$\frac{a+b}{c} = \frac{c}{a}.$$

Откуда могло появиться такая пропорция? Видимо, из подобия двух треугольников, один из которых имеет стороны c, a , а вторая — $a+b, c$. Треугольник со сторонами c, a уже есть, а треугольника со сторонами $a+b, c$ — нет, значит, его нужно построить. Это можно сделать двумя способами: либо на продолжении отрезка AC за точку C отложить отрезок, равный a , либо на продолжении отрезка BC за точку C отложить отрезок, равный b . В первом случае построенный треугольник не будет подобным данному.

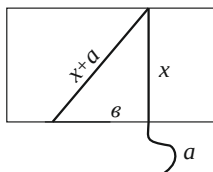
Пусть во втором случае получили $\triangle ABE$. Так как по построению $AC=CE$, то $\triangle ACE$ — равнобедренный, поэтому $\angle CAE = \angle AEC$. Заметим, что $\angle CAE + \angle AEC = 2\angle AEC = \angle ACB = 2\angle ACB$.

Значит, $\angle AEC = \angle CAB$. Тогда треугольники ABC и ABE подобны по двум углам, из пропорциональности их сторон следует требуемое равенство.

В зависимости от того к какой новой задаче сводится задача, возможны и другие способы решения. Конечно, задача считается решенной, если найден хотя бы один способ ее решения. Но почувствовать, каким образом можно получить новые способы решения задачи, полезно.

Пример 3. К потолку спортзала прикреплен канат, нижний конец которого длиной a метров лежит на полу. Когда канат натянули так,

чтобы его конец только касался пола, точка касания оказалась на расстоянии a метров от вертикального положения. Найдите высоту зала.



Одной из математических моделей этой задачи может быть чертеж, изображающий положение каната, и дополнительные записи о расстоянии между точками.

Второй моделью можно считать уравнение, которое составляется по первой модели

$$x^2 + b^2 = (x+a)^2.$$

После таких замен по эквивалентности понятно, решить указанную задачу – это все равно, что решить квадратное уравнение.

Замечание. При решении уравнений часто полезна следующая теорема: Если $y = f(x)$ – монотонно возрастающая функция, то уравнения $f(x) = x$ и $f(f(x)) = x$ эквивалентны.

Очевидно, что теорему можно обобщить на случай многократного повторения функции.

Пример 4. Решить уравнение: $\sqrt{1+\sqrt{x}} = x-1$.

Решение. Перепишем уравнение в следующем виде: $1+\sqrt{1+\sqrt{x}} = x$ и рассмотрим функцию $f(x) = 1+\sqrt{x}$. Эта функция монотонно возрастает. Имеем уравнение $f(f(x)) = x$. В соответствии с теоремой имеем эквивалентное уравнение $1+\sqrt{x} = x$. Откуда, учитывая, что корни уравнения неотрицательны, получим $x = (3+\sqrt{5})/2$.

Пример 5. Какая цифра стоит на сотом месте после запятой в произведении чисел $a=0,99\dots92$ и $b=0,99\dots94$, если каждая из чисел содержит по 99 девяток после запятой?

Решение. Замена по эквивалентности здесь – это другая форма записи числа. Перепишем данные числа в следующем виде:

$$a = 1 - 10^{-100}, \quad b = 1 - 14 \cdot 10^{-100}.$$

$$\text{Тогда} \quad ab = (1 - 8 \cdot 10^{-100}) \cdot (1 - 6 \cdot 10^{-100}) = 1 - 14 \cdot 10^{-100} + 48 \cdot 10^{-200}.$$

Значит, на сотом месте в произведении чисел $a=0,99\dots92$ и $b=0,99\dots94$ на сотом месте стоит цифра 6, а на 99-ом месте стоит 8.

Заметим, что в примерах 1, 2 мы заменили всю задачу на эквивалентную, а в этом примере – только условие. Разумеется, в некоторых

задачах, при поиске решения, достаточно заменить только заключение или часть задачи.

При решении многих задач замена информации по эквивалентности является обязательным первым шагом изучения любой задачи. Затем применяется, как правило, один из других способов сведения задачи к другой, например, учитывается особенность данных и иско-
мых.

Библиографический список

1. Дубинин Н.Н., Назарова Ю.Ю. Технология решения задач методом физического анализа // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2018. – № 12-1. – С. 125-29.

URL: <https://appliedresearch.ru/ru/article/view?id=12534>

2. Зиятдинов Ш.Г. Физика в задачах. // Учебно-методическое пособие для инновационных школ к спецкурсу «Практикум по решению физических задач повышенной трудности» – Уфа-Бирск: Бирский ГПИ, 2000. – 183 с.

3. Фридман Л.М., Турецкий Е.Н. Как научиться решать задачи // 2-е издание. – М.: Просвещение, 1984. – 175 с.

4. Пойа Д. Как решать задачу // Учебно-методическое пособие. М.: Либроком. 2010. 208 с.

5. Краткий психологический словарь / Сост. Л.А. Корпенко; под ред. А.В. Покровского, М.Г. Ярошевского. – М.: Политиздат, 1985. – 431 с.

6. Знаков В.В. Психология понимания: Проблемы и перспективы. // Учебно-методическое пособие – М.: ИП РАН, 2005. – 446 с.

Сведения об авторах

Михайлов Павел Никонович, доктор физико-математических наук, профессор СФ БашГУ). E-mail: mihaylovnp@mail.ru.

Михайлова Валентина Викторовна, кандидат педагогических наук, доцент. E-mail: mikhaylovavv@mail.ru.

ВЫВОД ЛОГИЧЕСКИХ СЛЕДСТВИЙ – ВАЖНЫЙ ЭЛЕМЕНТ ПОИСКА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

В работе показана роль следствий при сведении нестандартной задачи к стандартной. На конкретных примерах показано, как используются следствия из условия, заключения, отрицания заключения, из временных ограничений.

Ключевые слова: задача, решение задачи, логические следствия, проверка решений.

Mikhaylov P.N., Mikhaylova V.V.

CONCLUSION OF LOGICAL CONSEQUENCES IS AN IMPORTANT ELEMENT OF SEARCHING A SOLUTION TO THE PROBLEM

The paper shows the role of consequences in reducing a non-standard problem to a standard one. Using specific examples, it is shown how the consequences from the condition, conclusion, denial of the conclusion, from time constraints are used.

Keywords: task, solution of the problem, logical consequences, verification of solutions.

Понятие «решение задачи» в литературе рассматривается с трех позиций:

1. Решение как результат (ответ);
2. Решение как выполнение заранее известных действий, независимо от того, откуда субъект знает последовательность действий (выполняет ли он их по определенному алгоритму, нашел ли сам);
3. Решение как поиск самих действий и последовательности их выполнения для того, чтобы прийти к результату.

Заметим, что все три смысла понятия «решение задачи» существенны. Более узкое понимание приводит к методическим упущениям. Так решение задачи на доказательство следует понимать как: 1) поиск доказательства (доказательство как процесс), 2) проведение доказательства, 3) оформление доказательства (доказательство как результат). На уроках, как правило, больше внимания уделяют п. 2) и 3).

Вероятно, это связано с тем, что доказательство как результат можно зафиксировать, а доказательство как процесс зафиксировать трудно. В результате умение искать доказательство формируется стихийно.

Если под решением задачи понимать процесс, начинающийся с момента получения задачи до момента полного его завершения, то, очевидно, что этот процесс состоит не только из изложения уже найденного решения, а из ряда этапов; одним из которых и является изложение решения.

В работах [1, 2], следуя классическим работам методистов, выделен анализ задачи, как первый этап работы над задачами, раскрыт его смысл и даны методические рекомендации по обучению реализации. Отмечено, что главной задачей этапа является ее понимание, сутью которой является замена информации по эквивалентности [3].

Представим себе, что никакие замены по эквивалентности части или всей нестандартной задачи не позволили вам определить план решения; затем вы внимательно изучили особенности задачи и ее составляющих, но найти способ решения вам не удалось. Причиной трудностей, очевидно, является недостаток информации об объектах и отношениях, входящих в задачу. Одним из способов расширения информации о задаче является вывод следствий из данных или искомым. А из полученной расширенной информации отобрать те отношения (свойства, предложения и т.п.) которые позволили бы заменить данную задачу более простой задачей или подзадачей и, в конечном счете, свести ее к некоторой цепочке стандартных задач. Рассмотрим более подробно, как использовать в задачах этот способ.

При поиске способа решения логические следствия могут быть выведены:

- 1) из данных (синтетический метод рассуждений);
- 2) из предполагаемого ответа (аналитический метод);
- 3) из отрицания заключения доказываемого утверждения (метод от противного);
- 4) из временных ограничений и допущений (изучение частных случаев и гипотез).

Заметим, что анализ олимпиадных задач показывает, что именно этот метод расширения информации об объектах и отношениях задачи чаще всего используется при их решении. Применяя этот метод рассуждений, нужно помнить, что вывод следствий, в общем случае, не обладает свойством обратимости. Поэтому, если при решении за-

дачи используются обратные утверждения, их истинность нужно проверить особо.

Типичными примерами, в которых используются следствия из заключения задачи, являются задачи на построение. Решение таких задач можно разбить на 4 этапа: анализ, построение, доказательство, исследование. Но так как нас в первую очередь интересует поиск решения, то ограничимся рассмотрением лишь анализа задачи на построение. Смыслом остальных этапов можно ознакомиться, например, в [4].

Пример 1. Найти сумму квадратов действительных корней уравнения $x^2 - 2x + 3 = 0$.

Решение. Если x_1 и x_2 корни уравнения, то пользуясь теоремой Виета, получим следующие соотношения: $x_1 + x_2 = 2$, $x_1 x_2 = 3$. Тогда

$$(x_1)^2 + (x_2)^2 = (x_1 + x_2)^2 - 2x_1 x_2 = 4 - 6 = -2.$$

Однако такой ответ является ложным, так как сумма квадратов двух действительных чисел не может быть отрицательным числом. Такой результат объясняется тем, что данная задача сама противоречива.

Если метод вывода следствий применяется к противоречивой задаче, то одни следствия, полученные из данных, могут быть истинными, другие – ложными. Поэтому в том случае, когда непротиворечивость задачи неизвестна, вывод, полученный этим методом, также требует особой проверки. Именно с необходимостью такой проверки мы сталкиваемся при решении текстовых задач с введением неизвестной.

В каком случае нужно делать проверку решения? В методической литературе вопрос обсуждался достаточно долго, с обзором можно ознакомиться в книге для учителей В.И. Рыжика [5]. Здесь же приведем лишь итоговые выводы.

Если мы хотим, чтобы ученик делал проверку, то это наше требование должно быть ясно из контекста или из условия самой задачи. Только, в чем состоит проверка? Что должен сделать ученик, получив задание на проверку?

Вообще говоря, проверка полученного результата считается частью решения любой задачи, не только математической. Обязательность проверки в задачах с самым разным содержанием лишний раз подчеркивает внутри- и межпредметные связи. При этом проверяется: 1) ход решения; 2) соответствие полученного результата поставлен-

ному вопросу и всем условиям задачи; 3) условие задачи – нет ли в нем противоречия. Назовем эти проверки соответственно проверка-1, проверка-2, проверка-3.

Смысл проверки-1 достаточно очевиден и в методической литературе в его понимании нет разногласий. Не так обстоит дело с проверками 2 и 3. Если мы хотим делать проверку-2, то такое задание должно быть явно сформировано. Если этого не было сделано, то к ученику не может быть претензий, когда он проверку-2 не выполнил. Разумным исключением из такой договоренности между учителем и учеником можно считать проверку «предответа» по здравому смыслу. Так, естественно считать, что получающиеся в задачах длины, скорости, массы и т.п. положительны. Ученик, получив для такой величины отрицательный ответ, имеет право сразу же его отбросить.

К сожалению, при таком подходе не удастся добиться полной однозначности, ибо здравый смысл не формализуем. Понятно, например, что скорость автомобиля в стандартной задаче на движение – величина положительная. Но может ли она быть равной 15/17 км/ч?

Перейдем теперь к проверке-3. Рассмотрим следующую задачу.

Пример 2. В трех баках было вместе 50 л бензина, причем в первом баке было на 10 л больше, чем во втором. Когда из первого бака вылили в третий 26 л, во втором и третьем стало поровну. Сколько бензина было первоначально в первом баке?

Решение. Пусть в первом баке было сначала x литров, тогда во втором баке сначала было $x-10$ литров, а в третьем баке сначала было $50-x-(x-10)$ литров. После первого переливания из первого бака в третий 26 л в последнем стало $50-x-(x-10)+26$ литров. По условию задачи этот объем равен тому, который был во втором баке. Это приводит к уравнению $50-x-(x-10)+26=x-10$. Откуда $x=32$.

Такой ответ невозможен, так как тогда в третьем баке оказалось бы отрицательное число литров бензина, то есть, условие задачи содержит противоречие. Однако заметим, что в рассуждениях по составлению уравнения и в решении уравнения ошибок нет. Значит, проверка указывает, что ошибся не решающий, а составитель задачи. Поэтому появление таких задач на совести составителей.

Среди методистов нет однозначного ответа, нужны ли такие задачи? С одной стороны, если не будет задач с противоречивыми условиями – не будет проблем с проверкой-3, с другой стороны, такие задачи полезны тем, что перекидывают мостик от математики к ре-

альной жизни. Сплошь и рядом они встречаются в человеческой практике. Например, конструкторам космической техники пришлось решать такую задачу: из чего сделать сопло двигателя, если температура истекающих газов гораздо выше, чем температура плавления любого металла? Или, как принимать решение, если данные разведки противоречат друг другу?

Конечно, оценивая на правдоподобность задачи или решения из соображения здравого смысла, мы как будто покидаем сферу математики. Из двух альтернатив: «математика без здравого смысла» и «здравый смысл без математики» предпочтение, безусловно, надо отдать второй. В пользу последнего приведем лишь одну историю – историю открытия позитрона. Из уравнений, полученных П. Дираком, следовало, что возможны состояния электрона, когда его энергия отрицательна. Размышляя над этим, Дирак предположил существование новой частицы, что и было подтверждено позже экспериментально.

Пример 3. Найти наименьшее натуральное число n , для которого число n^n не является делителем числа 2017

Решение. Если $n^2 \leq 2017$ (временное ограничение), то 2017 делится на n^n так как числа $n, 2n, \dots, n(n-1), n^2$ содержатся среди чисел $1, 2, \dots, 2017$. А так как $44^2 < 2017 < 45^2$, то достаточно проверить делимость 2017 на n^n при $n \geq 45$.

1) 2017 делится $45^{45} = 5^{45} \cdot 3^{90}$, так как среди чисел $1, 2, \dots, 2017$ обязательно найдется 45 чисел кратных 5 и 90 чисел, кратных 3.

2) 2017 делится $46^{45} = 2^{46} \cdot 23^{46}$, так как среди чисел $1, 2, \dots, 2017$ обязательно найдется 46 чисел кратных 2 и 46 чисел, кратных 23, поскольку $23 \cdot 46 = 1058 < 2017$.

3) 2017 не делится 47^{47} , так как число 47 простое, и поэтому среди чисел $1, 2, \dots, 2017$ есть лишь 42 числа кратных 47. Действительно, $47 \cdot 42 = 1974 < 2017 < 47 \cdot 43 = 2021$.

Таким образом, вывод следствий является одним из интересных и важных способов получения из задачи стандартных. Хотя в работе применение способа показано на математических задачах, очевидно, что его с успехом можно целенаправленно использовать и при решении физических задач.

Библиографический список

1. Михайлов П.Н., Михайлова В.В. Принципы построения практикума по решению задач // Проектирование и реализация математического образования в школе и вузе: Сб. науч. Трудов / науч. ред. А.В.Дорофеев – Стерлитамак: СФ БашГУ, 2015. –С. 54-59.
2. Михайлов П.Н., Михайлова В.В. Еще раз о методиках обучения решению математических задач // Современные технологии в образовательных системах: теория и передовой опыт: сб. трудов III Междунар. науч.-практ. конф., 3-4 ноября 2016 г., г. Стерлитамак / отв. ред. С.С. Салаватова. – Стерлитамак: СФ БашГУ, 2016. – С. 18-23.
3. Михайлов П.Н. Пособие по подготовке к школьным математическим олимпиадам // Учебное пособие. – Стерлитамак. СФ БашГУ, 2017. – 195 с.
4. Михайлов П.Н., Михайлова В.В. О некоторых методических приемах и проблемах при изучении преобразований в курсах средней школы и педвуза // Геометрия и геометрическое образование в современной средней и высшей школе. – Тольятти, 27-29 ноября 2014 г. – Тольятти: ТГУ. – С. 75-79.
5. Рыжик В.М. 2500 уроков математики: // книга для учителя. – М.: Просвещение, 1993. – 240 с.

Сведения об авторах

Михайлов Павел Никонович, доктор физико-математических наук, профессор СФ БашГУ). E-mail: mihaylovnp@mail.ru.

Михайлова Валентина Викторовна, кандидат педагогических наук, доцент. E-mail: mikhaylovavv@mail.ru.

УДК 37. 372.853

Морозова О.А., Мухтарова Г.Р.

О ВНЕУРОЧНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПО ФИЗИКЕ В 7-ЫХ КЛАССАХ (ИЗ ОПЫТА РАБОТЫ)

Аннотация. Массово внеурочная деятельность в школьную физику влилась 4 года назад, в 2017-2018 учебном году. Учителям предложили самостоятельно создать учебные курсы внеурочной деятельности. Многие столкнулись с проблемой, ведь никаких методических разработок и рекомендаций предложено не было. Возникла

идея создания методического пособия по внеурочной деятельности для учителей физики.

Созданное авторское пособие представляет собой подробные поурочные разработки внеурочной деятельности «Физик-исследователь», предназначенной для обучающихся 7-х классов и рассчитанной на 34 часа (1 час в неделю).

Цель данного пособия – оказать методическую помощь учителям в процессе подготовки к занятиям внеурочной деятельностью; помочь в поиске, распределении и систематизации материала по занятиям. Название объясняется тем, что физика – экспериментальная наука и познание окружающего мира лучше всего проходит через исследование.

Ключевые слова. Физический эксперимент, внеурочная деятельность по физике, 7 класс

Morozova O.A., Mukhtarova G.R.

ABOUT EXTRACURRICULAR ACTIVITIES IN PHYSICS IN THE 7TH GRADES (FROM WORK EXPERIENCE)

Massive extracurricular activity was introduced in school physics 4 years ago, in 2017-2018 school academic. Teachers were offered to create their own training courses for extracurricular activities. Many faced a problem, because no methodological developments and recommendations were proposed (offered). There was an idea of creating a methodological manual for extracurricular activities for physics teachers.

The author's manual is a detailed development of extracurricular activities "Physics- Explorer". The manual is intended for 7th graders and for 34 hours (one a week).

The purpose of this manual is to provide methodological assistance to teachers in the process of preparing for extracurricular activities to help in the search, distribution and systematization of the material by occupation. The name is explained by fact that physics – experimental science and knowledge of surrounding world is best passed through research.

Keywords: Physics experiment, extracurricular activity, 7th grades.

Внеурочная деятельность в рамках реализации ФГОС второго поколения призвана вовлекать детей в проектные, творческие, спортивные мероприятия, социально-значимую деятельность, чтобы у учащегося формировалось правильное представление о себе самом, об окружающем мире, чтобы ребенок учился сопереживать, созидать,

оценивать и понимать, что такое истинные духовные ценности, нравственные идеалы.

Внеурочная деятельность представляет собой образовательную деятельность, осуществляемую в формах, отличных от классно - урочной, и направленную на достижение планируемых результатов освоения основной образовательной программы (в первую очередь личностных и метапредметных), на реализацию индивидуальных потребностей обучающихся путем предоставления спектра занятий, направленных на развитие детей.

Массово внеурочная деятельность в школьную физику влилась 4 года назад, в 2017-2018 учебном году. Учителям предложили самостоятельно создать учебные курсы внеурочной деятельности. Многие столкнулись с проблемой, ведь никаких методических разработок и рекомендаций предложено не было. Возникла идея создания методического пособия по внеурочной деятельности для учителей физики.

Созданное авторское пособие представляет собой подробные поурочные разработки внеурочной деятельности «Физик - исследователь», предназначенной для обучающихся 7-х классов и рассчитанной на 34 часа (1 час в неделю).

Цель данного пособия – оказать методическую помощь учителям в процессе подготовки к занятиям внеурочной деятельностью; помочь в поиске, распределении и систематизации материала по занятиям. Название объясняется тем, что физика – экспериментальная наука и познание окружающего мира лучше всего проходит через исследование.

Задачи курса «Физик–исследователь»: расширить физико-экологические знания учащихся; предоставить учащимся возможность осуществить ответственный выбор предварительного самоопределения профессиональной ориентации; создать условия для формирования и развития у обучающихся интеллектуальных и практических умений в области решения физических задач разных уровней; развить творческие способности учеников, их самостоятельность, интерес к исследовательской деятельности; обучить учеников обобщенным методам решения вычислительных, графических, качественных и экспериментальных задач, как действенному средству формирования физических знаний и учебных умений; способствовать развитию мышления, их познавательной активности и самостоятельности; способствовать формированию современного понимания науки.

Методы, используемые учителем в данном курсе: репродуктивные, при которых ученик усваивает знания и воспроизводит уже из-

вестные ему способы деятельности; продуктивные, когда ученик добывает субъективно новые знания в результате самостоятельной (или частично с помощью учителя) деятельности; проблемное изложение, предполагающее как усвоение готовой информации, так и элементы творческой деятельности; словесные (рассказ, объяснение, беседа, лекция); наглядные (демонстрационный эксперимент, схемы, рисунки и т.д.).

На занятиях применяются коллективные и индивидуальные формы работы: постановка, обсуждение и решение задачи.

При проведении занятий по каждой теме главное внимание обращается на формирование умения решать экспериментальные задачи, на накопление опыта решения экспериментальных задач различной трудности. Развивается самая общая точка зрения на решение задач как на описание того или иного физического явления физическими законами.

В процессе обучения ученики приобретают следующие умения и навыки: наблюдать и описывать явления; выдвигать гипотезы, объясняющие физические явления; работать с дополнительной литературой; выступать с сообщениями и докладами; решать вычислительные, экспериментальные, графические и качественные задачи.

В пособие вошли экспериментальные задания, которые подбирались и адаптировались под учащихся педагогами на протяжении 5-6 лет.

Для примера можно привести несколько занятий из пособия:

«...Занятие 3. Измерение толщины стеклянной пластинки.

К данному занятию необходимо подготовить: весы с разновесами, измерительную линейку, штангенциркуль, лист миллиметровой бумаги, стеклянную пластинку.

Целесообразно разделить учащихся на группы по 4-5 человек.

Перед учащимися в начале занятия ставится цель – измерить толщину стеклянной пластинки. Для достижения этой цели учащиеся самостоятельно выбирают необходимые приборы и определяют ход работы. Предложенные варианты обсуждают и выбирают самый оптимальный. Проводят необходимые измерения различными способами, затем полученный результат сравнивают с результатом измерения толщины пластинки с помощью штангенциркуля.

Возможные варианты выполнения работы.

а) Взвесить пластинку на весах; б) по справочнику определить плотность стекла; в) из формулы массы выразить объём пластинки;

г) линейкой определить длину и ширину пластинки, а затем вычислить её площадь; д) зная, что объём – это произведение площади на высоту, вычислить толщину пластинки.

Сравнить толщину пластинки с делениями листа миллиметровой бумаги.

Измерить толщину пластинки линейкой.

Сравнить результаты, сделать вывод, о том, какой метод самый точный, самый быстрый, для какого случая нужны точные измерения?

Занятие 4. Наблюдение явления инерции

В начале занятия целесообразно вспомнить понятие инерции, изученное на уроке физики: явление сохранения скорости тела при отсутствии действия на него других тел называется инерцией. Затем в беседе попросить привести примеры движения тел по инерции. Или разбить ребят на группы и попросить за определенное время (5 минут) написать примеры движения тел по инерции. Подобный вариант работы заинтересует ребят именно соревновательным духом.

Цель занятия – научиться наблюдать и объяснять физическое явление.

Возможные варианты выполнения работы.

1. на пустой стакан положить картонную карточку, на карточку – монетку. Резким щелчком выбить карточку. Что произойдет с монетой?

2. сложить на столе столбиком несколько шашек. Резким движением линейки выбить нижнюю шашку. Что случится с остальными шашками?

Придумать свой вариант подобного опыта по наблюдению явления инерции.

Описать и объяснить результат...»

Очень надеемся, что данное пособие будет полезно коллегам.

Библиографический список

1. Алексеев Н.Г. О целях обучения школьников исследовательской деятельности // VII юношеские чтения им. В.И. Вернадского: Сб. методических материалов. – М., 2008. – С. 5.

2. Бреховский Л.М. Как делаются открытия // Методический сборник «Развитие исследовательской деятельности учащихся». М., 2001. – С. 5-29.

3. Горев Л.А. Занимательные опыты по физике. Книга для учителя. – М.: Просвещение, 1985.

4. Ланге В.Н. Экспериментальные физические задачи на смекалку. – М.: Наука, 1974.

5. Физика: великие открытия / Популярная школьная энциклопедия. – М., 2001.

6. Физика: учебник для 7 класса общеобразовательных организаций / Э.Т. Изергин. – М.: ООО «Русское слово - учебник», 2019. – 232 с.: ил. – (ФГОС. Инновационная школа).

7. Физика: учебник для 9 класса общеобразовательных организаций / Э.Т.Изергин. – М.: ООО «Русское слово - учебник», 2019. – 256 с.: ил. – (ФГОС. Инновационная школа).

Сведения об авторах

Морозова Ольга Анатольевна, учитель физики и астрономии, МАОУ «Лицей № 3» ГО г. Стерлитамак РБ. E-mail: morozovaol@yandex.ru.

Мухтарова Гузалия Робертовна, магистрант, учитель физики и астрономии, ФГБОУ ВО «БГПУ им. М. Акмуллы», МАОУ «Лицей № 12» ГО г. Стерлитамак РБ. E-mail: guzal.str@mail.ru.

УДК 621.9

Мунасыпов И.М.

ПОДГОТОВКА БАКАЛАВРОВ ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБУЧЕНИЯ С УЧЕТОМ СТАНДАРТА КОМПЕТЕНЦИЙ WORLDSKILLS INTERNATIONAL

В статье рассмотрены вопросы возникновения и становления движения WorldSkills на международном уровне. Описано внедрение в образование стандартов движения как основы подготовки бакалавров профессионального обучения на базе учебного центра «СТАН», Стерлитамакского филиала «Башкирский государственный университет».

Ключевые слова: учебный центр, повышение квалификации, компетенции WorldSkills, станки с числовым программным управлением (ЧПУ), компания «СТАН», естественнонаучный факультет

Munasypov I.M.

**PREPARATION OF BACHELORS OF PROFESSIONAL
TRAINING IN ACCORDANCE WITH THE WORLDSKILLS
INTERNATIONAL COMPETENCE STANDARD**

The article discusses the emergence and formation of the WorldSkills movement at the international level. The article describes the introduction of traffic standards into education as the basis for training bachelors of vocational training on the basis of the STAN training center, Sterlitamak branch of the Bashkir State University.

Keywords: training center, advanced training, WorldSkills competencies, numerical control (CNC) machines, STAN company, faculty of natural science.

Движение WorldSkills International (WSI) зародилось в послевоенной Испании, которая, как и многие страны в тот период, переживала нехватку рабочих рук. Чтобы возродить интерес к рабочим профессиям, один из инициаторов движения Франциско Альберт-Видаль решил провести конкурс профмастерства среди молодых специалистов. Они узнавали о соревнованиях из газет и за свой счёт отправлялись в Мадрид со всей Европы. Хотелось и себя показать и на других посмотреть.

Затем к движению присоединились и другие страны: Италия, Марокко, Германия, Великобритания, Швейцария, Франция. Россия присоединилась к движению WorldSkills в 2012 году и стала шестидесятым членом участника [1].

За 70 лет масштабы чемпионатов профессионального мастерства выросли: в 1950 г. было всего 12 конкурсантов, в 2017 г. на 44-м чемпионате WorldSkills в Абу-Даби – уже 1300. На международном первенстве в Казани, который проходил с 22 по 27 августа 2019 г., число участников достигло – 1500 [2].

Хотя основная миссия движения осталась прежней, изменения на рынке труда и развитие технологий сформировали новые вызовы. Автоматизация и переход к цифровой экономике создали потребность в рабочих кадрах нового типа, способности которых измеряются компетенциями, а не дипломами и грамотами.

WorldSkills представляет собой некоммерческое движение, само существование и развитие которого направлено на реализацию следующих задач [3]:

1. Повысить престиж рабочих профессий среди трудоспособного населения и подрастающей молодежи.

2. Развивать профессиональное образование, создавая различные институты и постоянно совершенствуя наполнение обучающих программ, а также технологии реализации учебного процесса.

Теперь необходимо готовить не просто молодого конкурентоспособного профессионала, а адаптированного к современным реалиям специалиста, готового работать бок о бок с умными аппаратами и робототехникой, постоянно расширять свои знания, что повлияло и на подготовку педагогических кадров профессионального обучения.

По мнению экспертов, повышенные требования к качеству и увеличившийся спрос на детали со сложной пространственной геометрией, совершенствование математического аппарата CAD/CAM систем, снижение стоимости станков с ЧПУ, включая 5-координатные станки, привели к росту заинтересованности к возможностям многоосевой обработки. При этом станки с ЧПУ позволили значительно повысить сложность производимых изделий, а также увеличить скорость и точность их производства [4].

Студенты естественнонаучного факультета проходят стажировку на станкостроительном предприятии в Стерлитамаке, где знакомятся с производством, пробуют себя в качестве инженеров, конструкторов, технологов, изучают особенности техники безопасности производства и получают необходимые для станкостроителей навыки. Многие дисциплины учебного плана изучаются с использованием оборудования учебного центра, непосредственно на рабочих местах. Отметим, что уже в 2019 году группа студентов, обучающихся по направлению подготовки 44.03.04 Профессиональное обучение, направленность «Машиностроение и материалобработка», прошли подготовку по рабочей профессии оператор станков с программным управлением, широко востребованной на всех ключевых производствах страны. В этом же году была получена лицензия и осуществлен приём студентов по направлению подготовки 15.03.01 Машиностроение.

Следует отметить, что Стерлитамакский филиал Башкирского государственного университета – первая в Республике Башкортостан базовая площадка Академии Ворлдскиллс Россия. Открытие ее в городе, где находится одна из производственных площадок группы компаний СТАН – лидера станкостроительной отрасли России – является важным шагом в деле взаимодействия производства и сферы образования для подготовки специалистов в области станкостроения.

Задачей естественнонаучного факультета СФ БашГУ является также обеспечение привлекательности этих отраслей за счет инноваций различного типа для школьников, выпускников образовательных организаций и инвесторов. Для этого на базе факультета создан научно-образовательный центр «Промышленная робототехника и медицинская физика», главная цель которого – обеспечение взаимодействия образования, науки и производства. В структуре центра открыт научно-производственный участок по разработке перспективных образцов в области робототехнических изделий для станкостроения.

В ближайшие годы с учетом стандартов Ворлдскиллс Россия в планах филиала запустить новые программы в области беспилотных технологий, мобильной робототехники, мехатроники и электроники, инженерному дизайну CAD.

Библиографический список

1. Агентство стратегических инициатив [Электронный ресурс]. – Режим доступа. – URL: <http://asi.ru/> (Дата обращения 02.12.2019).
2. Официальный сайт WorldSkills Russia [Электронный ресурс]. – Режим доступа. – URL: <http://worldskills.ru/> (Дата обращения 02.12.2019).
3. Теплухина А.В., Смирнова Т.В. Основные направления и результаты движения WorldSkills в России // Российская экономика в условиях современного кризиса: проблемы и пути выхода: сборник материалов научно-практической конференции студентов, магистрантов, аспирантов, преподавателей и научных работников: 20-летию высшей школы экономики КНИТУ посвящается. 2016. № 12. С. 240-243.

Сведения об авторах

Мунасыпов Ильдар Мухтарович, кандидат педагогических наук, доцент кафедры технологии и общетехнических дисциплин, СФ БашГУ (Стерлитамак). E-mail: sgpa_tef@bk.ru.

Мусина Л.Р.

ЦИФРОВЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ В ОБРАЗОВАНИИ

В эпоху интенсивного развития информационных технологий «цифровая трансформация» социально-экономических отношений является одной из задач государства. В рамках этой трансформации необходимо более активное использование цифровых инструментов в образовании. В статье раскрывается термин «цифровизация» и дается краткое определение цифровых инструментов. Кроме того, приводится описание наиболее популярных цифровых инструментов, которые используются в школьном образовании.

Ключевые слова: цифровизация, цифровые инструменты, образовательные платформы, информационные технологии, образовательные программные средства.

Musina L.R.

DIGITAL INSTRUMENTS IN EDUCATION

In the era of intensive development of information technologies, "digital transformation" of socio-economic relations is one of the tasks of the state. As part of this transformation, more active use of digital tools in education is required. The article reveals the term "digitalization" and gives a brief definition of digital tools. In addition, a description of the most popular digital tools used in school education is provided.

Key words: digitalization, digital tools, educational platforms, information technology, educational software.

Одним из направлений государственной политики в России является цифровизация взаимоотношений государства и общества. В нашей стране создаются цифровые платформы, утверждаются концепции цифровой трансформации социальной и экономической сферы, многие услуги оказываются с помощью цифровых технологий.

Однако, как нам кажется, невозможно полноценно реализовать политику в социально-экономической сфере, если не затрагивать систему школьного образования. Начиная с 2019 года в рамках федерального проекта «Цифровая образовательная среда» ведется работа по оснаще-

нию организаций современным оборудованием и развитие цифровых сервисов и контента для образовательной деятельности» [4].

Следовательно, у учителей будет больше возможностей по использованию цифровых образовательных инструментов в своей деятельности. Для их эффективного использования необходимо иметь полное представление о сущности, разнообразии и возможностях цифровых инструментов.

Сам термин «цифровизация» означает использование цифровых технологий, т.е. связанных с электронными вычислениями и преобразованиями технологий. По своей сути, цифровые технологии являются частным случаем информационных, когда информация преобразуется, сохраняется или передается с помощью гаджетов и электронных устройств с использованием специальных программ.

К цифровым инструментам в образовании относят цифровые технологии, способствующие повышению качества образования за счет развития скорости и эффективности передачи информации. С помощью указанных инструментов упрощается отслеживание учебных результатов, оценивание прогресса учащихся, а также повышается их интерес и вовлеченность в обучение. Цифровые инструменты включают в себя видеосервисы, социальные сети, образовательные платформы, игровые учебные материалы, сервисы для работы с графикой, и т.д., такое многообразие средств позволяет сделать образование доступным и открытым, использовать различные формы получения, репродукции, анализа и применения знаний [5, с. 156].

Выделяют различные классификации цифровых образовательных инструментов. Например, Л.М. Шайхутдинова приводит следующие:

- инструменты для контроля знаний; облачные технологии; инструменты для организации внеурочной деятельности и для организации и проведения дистанционных курсов;
- графические редакторы; программы для подготовки презентаций и визуализации данных; инструменты для обработки видео и создания анимационных роликов; сервисы по созданию веб-квестов, кроссвордов и пр.; системы для создания тестов; сервисы для коллективного обучения;
- инструменты для организации совместной деятельности, для осуществления обратной связи, для создания цифровой образовательной среды и для организации онлайн-уроков [6, с. 514].

Но нам кажется, что в первую очередь следует различать общие цифровые инструменты и специальные. Общие инструменты могут использоваться учителями вне зависимости от преподаваемого предмета. Наверное, наиболее популярным общим цифровым инструментом в образовании является текстовый редактор (в частности, MS Word), благодаря которому осуществляется подготовка к любому виду урока. Удобный интерфейс, широкий функционал для редактирования и оформления текста, проверка орфографии – все это существенно облегчает деятельность педагога.

Другим популярным инструментом, который используется многими учителями, является презентация. Мультимедийные презентации особенно эффективны при изложении нового материала, они также могут использоваться при повторении материала или проверке знаний учащихся.

Нельзя не упомянуть и тот факт, что сегодня традиционный инструмент образования – учебник – зачастую тоже представлен в цифровом виде. Отметим, что речь идет не просто об учебнике, который представлен в электронном формате (.doc, .pdf, .djvu), а о специальных приложениях.

Электронная форма учебника (ЭФУ) имеет такую же структуру, как и традиционный учебник, но дополнен мультимедийными элементами и интерактивными ссылками. Использование такого инструмента не просто позволяет познакомить учащихся с новой информацией, но и проследить за успехами школьника [2, с. 89].

В виде программного обеспечения сегодня представлены классные журналы и школьные дневники. В них вносятся не только информация о полученных учащимся оценках, но оперативно вносятся изменения в школьном расписании, представляется домашнее задание. Это особенно удобно, когда в качестве самостоятельного задания учащимся предлагается пройти дистанционное тестирование, а домашнее задание является ссылкой на страницу в интернете.

В условиях пандемии другим универсальным инструментом послужили программные средства, обеспечивающие дистанционное обучение. Здесь можно выделить программы для организации конференц-связи (Zoom, Skype), которые позволили учителю и учащимся общаться в онлайн-режиме, поддерживая связь между ними. Взаимодействие между учителем и учащимся может быть организовано и с помощью социальных сетей (ВКонтакте), мессенджеров (WhatsApp, Viber, Telegram), электронной почты.

Другая группа инструментов обеспечивает учащимся доступ к учебным материалам и образовательным ресурсам: электронные курсы (Moodle) и онлайн-платформы (ЯКласс, Учи.ру). Тем самым, учителя могут создавать электронные курсы самостоятельно или использовать готовые материалы.

На уроках математики могут использоваться как предметные задания с указанных выше образовательных платформ, так и специфические цифровые инструменты. Например, математические пакеты Mathcad, Maple, Mathematica, позволяющие производить сложные вычисления, строить математические модели различных процессов. Кроме того, используя их, учащиеся могут лучше познакомиться с функциями, в том числе и за счет возможности строить графики в этих программах. Построение графиков, геометрических чертежей и ввод формул можно осуществлять и в других приложениях – MathType, Geogebra, Desmos [1, с. 11].

В качестве инструмента обучения учитель математики может использовать различные тренажеры и онлайн-тесты (skills4u.ru, Comp-science.ru, onlinetestpad.com).

Особым видом цифрового инструмента в образовании является виртуальная лаборатория. Так, лаборатория «Живая математика» позволяет решать широкий круг задач по различным разделам школьной математики – алгебры, тригонометрии, планиметрии, стереометрии, и пр. Кроме того, Живая математика предоставляет пользователям возможность динамического преобразования графиков и чертежей, делая процесс изучения более наглядным.

Для графического способа передачи информации может использоваться инфографика, с помощью которой можно представить материал в виде графика, диаграммы, таблицы, схемы. Для создания и редактирования инфографики в обучении могут использоваться различные сервисы, интерактивные плакаты, интеллектуальные карты (Cacco, Mindmeister, ThingLink, PowToon) [3, с. 413].

На уроках математики использование инфографики позволяет более наглядно изобразить алгоритм доказательства теоремы, решения задачи. Красочные детали привлекают внимание учащихся и облегчает запоминание, упрощая процесс восприятия учебного материала. Кроме того, школьники могут создать собственную схему в инфографике, тем самым закрепляя полученные знания.

В последние годы активно разрабатываются технологии виртуальной реальности, которые начинают использоваться и в образова-

нии. С помощью виртуальных инструментов можно более эффективно внедрять геймификацию в обучение математике, устраивать виртуальные экскурсии в лаборатории и учебные заведения, расширять возможности учащихся и мотивировать их на изучение математических наук.

Такое многообразие цифровых инструментов заметно обогащает процесс обучения и насыщает методическое содержание образования. Цифровые инструменты могут использоваться учителем для подготовки к уроку, на этапе изучения нового материала, для осуществления контроля результатов учащихся.

Как видим, невозможно описать все многообразие цифровых инструментов, которые доступны учителям. Они снижают объем бумажной работы, позволяют более эффективно выстраивать процесс обучения. Затрачивая меньше времени на выполнение рутинной работы, педагог может более качественно подготовиться к уроку, а цифровые инструменты сделают процесс обучения более интересным и насыщенным.

Библиографический список

1. Панюкова С.В. Цифровые инструменты и сервисы в работе педагога: учеб.-метод. пособие. – М.: Изд-во «Про-Пресс», 2020. – 33 с.
2. Сергеева М.Г. Электронная форма учебника как инструмент организации современного урока // Педагогическое искусство. – 2017. – № 2. – С. 85-93.
3. Тимофеева Н.М., Тимофеева Т.И. Инфографика как средство цифровизации образования // Системы компьютерной математики и их приложения. – 2020. – № 21. – С. 410-415.
4. Цифровая образовательная среда: федеральный проект // Минпросвещения России: официальный сайт. – Режим доступа: <https://edu.gov.ru/national-project/projects/cos/> (дата обращения: 15.08.2021).
5. Шайхутдинова Л.М. Обзор цифровых инструментов педагога для организации дистанционного обучения // Скиф. – 2021. – № 4. – С. 155-160.
6. Шайхутдинова Л.М. Цифровые инструменты педагога для организации дистанционного обучения // Скиф. – 2021. – № 5. – С. 512-516.

Сведения об авторах

Мусина Л.Р., магистр, СФ БашГУ (Стерлитамак), учитель математики МАОУ Лицей №12. E-mail: musina.lyajsan@inbox.ru.

УДК 37. 372.853

Мухтарова Г.Р., Морозова О.А.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЦИФРОВОЙ ЛАБОРАТОРИИ «АРХИМЕД» НА УРОКАХ ФИЗИКИ

В работе приведена методика использования цифровых датчиков на уроках физики

Ключевые слова: физический эксперимент, информационные технологии, цифровая лаборатория, цифровые датчики.

Mukhtarova G.R, Morozova O.A.

USING THE DIGITAL LABORATORY "ARCHIMEDES" IN PHYSICS LESSONS

The paper presents a technique for using digital sensors in physics lessons

Keywords: Physics experiment, information technology, digital laboratory, digital sensors.

Физика – наука экспериментальная. Поскольку между физикой – наукой и физикой – учебным предметом существует тесная связь, процесс обучения физике заключается в последовательном формировании новых для учеников физических понятий и теорий на основе немногих фундаментальных положений, которые опираются на опыт. В ходе этого процесса находит отображение индуктивный характер установления основных физических закономерностей на базе эксперимента.

В современном мире информационные технологии занимают огромное значение для человека. Цифровая техника находит все большее применение. Поэтому неудивительно, что и учебные занятия теперь проходят с применением ИКТ. Практически все учебные кабинеты оснащаются компьютерной техникой.

Использование цифровых лабораторий позволяет получить представление о смежных образовательных областях: информационные технологии; современное оборудование исследовательской лаборатории; математические функции и графики, математическая обра-

ботка экспериментальных данных, статистика, приближенные вычисления; методика проведения исследований, составление отчетов, презентация проделанной работы.

При использовании различных цифровых лабораторий (L-micro, «Архимед», Pasco, «Научные развлечения» и др.) целесообразно и успешно реализуются следующие методы обучения: метод проблемного изложения, частично-поисковый и исследовательские метод.

Дидактические возможности цифровых лабораторий: решение задач, самостоятельное проектирование технологических процессов, конструирование приспособлений, оснастки; использование в качестве источника учебной информации, в качестве справочного и инструктивного материала при выполнении упражнений, лабораторно-практических работ; изучение быстро или медленно протекающих процессов, недоступных непосредственному восприятию; изучение внутреннего устройства машин, механизмов, агрегатов и процессов в них; изучение циклических процессов, действий, способов; проведение лабораторно-практических работ иллюстративного и исследовательского характера.

Лаборатория «Архимед»

Данная цифровая лаборатория, также, как и лаборатория «L-micro» имеется во всех школах в России.

Цифровые лаборатории «Архимед» представляют собой специальное оборудование, позволяющее сочетать натурный эксперимент по физике, химии или биологии с преимуществами цифровой регистрации параметров этого эксперимента, когда измеряемые данные и результаты их обработки отображаются непосредственно на экране компьютера.

А если в кабинете установлен мультимедийный проектор, то экран компьютера во время демонстрационного эксперимента, который проводит учитель, отображает на настенном экране результаты в виде графиков, которые будут видны всему классу.

Лаборатория Архимед состоит из:

- мощного, мобильного и простого в использовании карманного персонального компьютера Palm на базе операционной системы Palm OS – Nova5000;
- измерительного интерфейса TriLink;
- 4-5 (в наборе до 22-х) цифровых датчиков;
- дополнительно оснащается цифровым микроскопом.

Во время работы с цифровым комплектом «Архимед» эксперимент приобретает большую степень точности, нежели использование стандартного оборудования. Также цифровая лаборатория способна записывать эксперимент, а затем его можно воспроизвести, либо подключить регистратор к проектору – все это позволяет просматривать и одновременно анализировать результат большим количеством человек, соответственно упрощает работу в группе.

Лабораторная работа № 1

Тема: Определение ЭДС при последовательном и параллельном соединении источника тока

Цель работы: рассчитать ЭДС при последовательном и параллельном соединении

Оборудование: 1) аккумуляторные батареи;

2) цифровая лаборатория «Архимед»:

Компьютер Nova



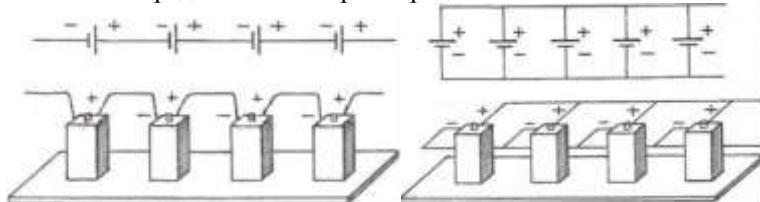
Датчик напряжения DT001 до $\pm 25\text{В}$



Датчик тока DT005 до $\pm 2,5\text{А}$



Ребятам предлагается собрать предложенные схемы поэтапно:



И выполнить работу по известному алгоритму.

1. Начертите таблицу:

№ опыта	Источник электрической энергии ВУП, В	1-й отсчет	2-й отсчет	ЭДС, ϵ , В	Внутреннее сопротивление, r , Ом
		R_1 Ом Сила тока I_1 , А	R_2 Ом Сила тока I_2 , А		
1	1	1	2		

2. Собрать цепь по схеме, поочередно добавлять батареи. При последовательном соединении два соседних источника соединяются разноименными полюсами.

4. Замкнуть цепь, введя меньшее сопротивление R_1 . Записать величину силы тока I_1 . Разомкнуть цепь.

5. Замкнуть цепь, введя большее сопротивление R_2 . Записать величину силы тока I_2 . Разомкнуть цепь.

6. Вычислить значение ЭДС и внутреннего сопротивления источника электрической энергии.

7. Сделать вывод.

Библиографический список

1. Абалуев Р.Н., Астафьева Н.Г., Баскакова Н.И., Бойко Е.Ю., Вязавова О.В., Кулешова Н.А., Уметский Л.Н., Шешерина Г.А., Интернет-технологии в образовании: Учебно-методическое пособие. Ч.3. // Тамбов: ТГТУ, 2002 – С. 4-5.

2. Жарков, Ф.П. Использование виртуальных инструментов Lab VIEW / Ф.П. Жарков, В.В. Каратаев, В.Ф. Никифоров, В.С. Панов. Под ред. К.С. Демирчана и В.Г. Миронова. – М.: Солон - Р, Радио и связь, Горячая линия – Телеком, 1999. – 268 с.

3. Каминский В.Ю. Использование образовательных технологий в учебном процессе // Завуч, 2005, № 3. – С. 4-14.

4. Фещенко Т.С. Исследовательское обучение физике в школе – первые шаги в мир науки / Т.С. Фещенко // Физика в школе. – 2012. - № 2. – С. 17-19.

Сведения об авторах

Мухтарова Гузалия Робертовна, магистрант, учитель физики и астрономии, ФГБОУ ВО «БГПУ им. М. Акмуллы», МАОУ «Лицей № 12» ГО г. Стерлитамак РБ. E-mail: guzal.str@mail.ru.

Морозова Ольга Анатольевна, учитель физики и астрономии, МАОУ «Лицей № 3» ГО г. Стерлитамак РБ. E-mail: morozovaol@yandex.ru.

Несмиянова О.В.

**ТЕХНОЛОГИЯ ОРГАНИЗАЦИЯ УРОКА С ПРИМЕНЕНИЕМ
КЛЮЧЕВЫХ УЧЕБНЫХ СИТУАЦИЙ В УСЛОВИЯХ
ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ**

В статье рассматриваются ключевые учебные ситуации при решении физических задач.

Ключевые слова: Ключевая учебная ситуация, базовые задачи, решение задач.

Nesmiyanova O.V.

**TECHNOLOGY LESSON ORGANIZATION WITH THE
APPLICATION OF KEY LEARNING SITUATIONS IN THE
CONDITIONS OF DISTANCE LEARNING**

The article discusses key learning situations when solving physical problems.

Keywords: Key learning situation, basic tasks, problem solving.

Решение задач является одной из основных направлений изучения физики. Из своей педагогической практики могу сказать, что наибольшие трудности при изучении физики, учащиеся испытывают при решении задач, т. е. когда требуется применить знания. Эти трудности представляются ученикам настолько большими, что многие из них даже отказываются от попыток решать задачи.

На первый взгляд кажется, что всё просто – выучи закон и решай задачу. На деле оказывается всё не так. В результате мы видим, что многие учащиеся в наши дни не любят физику. Почему так происходит?

Однозначного ответа на этот непростой вопрос нет. Но одна из важнейших причин, я думаю, заключается в том, что физика достаточно сложна, гораздо сложнее истории, литературы, биологии и даже математики. Часто мы не берём в расчёт, что для понимания и знания физики, учащиеся помимо общих знаний и специальных умений должны ещё уметь решать большое количество задач. Именно

решение задач и является трудным для учеников. Вследствие этого у ребят начинает формироваться отрицательное отношение к физике.

Почему обучаемся трудно решать задачи по физике?

Вот несколько причин:

- Ученики не понимают смысла физических законов.
- Ученики не умеют идеализировать ситуацию, описанную в задаче, выявляя главное и отбрасывая второстепенное.
- Ученики не запоминают физических формул и обозначений физических величин.
- Ученики часто не знают, с чего начать решение задачи.
- Ученикам неинтересно решать задачи.

При традиционной методике обучения решению задач школьники решают только уже поставленные задачи. Во многих случаях решение таких задач не всегда является творческим процессом. Чтобы справиться с этой трудностью, необходимо изменить сам процесс, придав решению задач творческий, исследовательский характер: надо учить ребят ставить задачи. Другими словами, решению задачи должна предшествовать постановка задачи, причём желательно совместно с учениками.

В школьном курсе физики очень много задач, но если разобраться, то можно заметить, что большинство из них группируются вокруг нескольких типичных учебных ситуаций. Эти ситуации и называют ключевыми.

Ключевые учебные ситуации — важнейшая связь между «теорией» и «задачами».

Одна из главных особенностей методики состоит в том, что к постановке задач привлекаются сами ученики. Тогда постановка и решение задач становятся творческим процессом, интересным и доступным для большинства учеников.

С одной стороны, задачи рассматриваются при изучении ключевых учебных ситуаций, в которых наглядно проявляется действие физических законов, с другой стороны, во время решения задач на основе ключевых учебных ситуаций усваивается теория.

И ещё одна очень важная роль ключевых учебных ситуаций. Результатом изучения школьного курса физики должен быть не набор решённых задач (это быстро забывается), а понимание учениками физических законов и физическая интуиция, которая может развиваться именно при рассмотрении ключевых ситуаций.

У каждой ключевой учебной ситуации есть свои закономерности, которые можно называть секретами. Перед решением задач по тому или иному разделу школьного курса физики надо сначала изучить ключевые учебные ситуации, относящиеся к этому разделу, и вместе с учениками «открыть секреты» этих ситуаций, применив их тут же при постановке задач вместе с учениками. При этом надо ставить задачи, которые ученики могут решить устно: тогда их внимание сосредотачивается на понимании законов физики, проявившихся в данной ключевой ситуации, а не на форме записи и долгих расчетах. С использованием ключевых учебных ситуаций при обучении физики, я впервые познакомилась, обучаясь на дистанционных курсах педагогического университета «Первое сентября». Меня привлекло к данным курсам их название «Как научить решать задачи по физике основная школа. Подготовка к ГИА.»

Рассмотрим более подробно работу с ключевыми учебными ситуациями на примере темы физики 8 класса:

8.3.2.5 - определять количество теплоты, полученной или отданной в процессе теплопередачи

8.3.2.6 - объяснить физический смысл удельной теплоемкости

8.3.2.8 - исследовать закон сохранения и превращения энергии в тепловых процессах

8.1.3.2 - определять факторы, влияющие на проведение эксперимента

8.3.2.7 - применять формулу количества теплоты, выделяемого при сгорании топлива, в решении задач

8.3.2.9 - применять уравнение теплового баланса при решении задач

Ключевая ситуация «Количество теплоты»

1 Уровень.

Воде, подсолнечному маслу, керосину сообщили одинаковое количество теплоты. Какая из жидкостей нагреется до большей температуры? Масса всех жидкостей одинакова.

2 Уровень.

На сколько градусов нагреется 2 кг воды при сжигании 50 г каменного угля, если считать, что вся энергия, выделенная при сгорании угля, пойдет на нагревание воды?

3 Уровень.

Рассчитайте, с какой высоты упала капля воды, чтобы при ударе полностью испарится? Начальная температура капли 20°C. Сопротив-

ление среды и энергию, затраченную на разрушение поверхности капли не учитывать.

Фрагменты уроков «Решение задач по теме: Количество теплоты»

1) Подготовка к решению задач

В начале урока повторяю с учащимися теоретический материал. Сначала анализируем формулу $Q=mc(t_2 - t_1)$. Учащиеся должны усвоить, что $Q \sim m$; $Q \sim c$; $Q \sim (t_2 - t_1)$.

После этого можно посмотреть видеодемонстрации опытов, доказывающие эти зависимости.

Затем проводим работу вывод из формулы $Q=mc(t_2 - t_1)$ массы, удельной теплоемкости, температуры (для многих обучающихся это трудно).

Затем отрабатываю физический смысл удельной теплоемкости по таблице в учебнике. Необходимо чтобы учащиеся усвоили, что удельная теплоемкость – это количество теплоты, необходимое, чтобы 1 кг данного вещества нагреть на 1°C или столько тепла выделит 1 кг вещества при охлаждении на 1°C .

2) После этого решаем задачу 1 уровня вместе с учащимися.

Учитель. Что нам известно в данной задаче?

Ученик. Так как в задаче даны разные вещества нужно посмотреть их удельная теплоемкости в таблице. А также дано, что Q одинаково и m равная у всех тел.

Ученик. Так как удельная теплоемкость у воды самая большая, то ей нужно расходовать больше тепла для нагревания на 1°C , значит вода нагреется до меньшей температуры. А подсолнечное масло имеет самую маленькую удельная теплоемкость, значит он нагреется до большей температуры.

После этого предлагаю решить подобные задачи из (1) № 992, 997, 998. (при традиционном обучении можно организовать работу в группах или парах)

3) Перед решением задачи 2 уровня повторяем формулу для вычисления количества теплоты при сгорании керосина.

Затем обращаем внимание учащихся на процессы, о которых говорится в задаче, проводя простую видеодемонстрацию – нагревание воды на спиртовке.

Учитель. Что вы наблюдаете, что происходит с водой?

Ученик. Вода нагревается.

Учитель. Почему нагревается вода?

Ученик. Ей отдает тепло при сгорании спирт.

Учитель. Если не учитывать, что часть тепла передается окружающему воздуху, то какой вывод мы можем сделать?

Ученик. Сколько тепла отдал спирт, то столько же тепла получила вода. $Q_1 = Q_2$

Учитель. Еще раз прочитайте задачу. Похожа ли заданная ситуация на ту, что мы рассмотрели?

Ученик. Похожа, вода нагревается – забирает тепло, а спирт сгорает – дает тепло.

$$Q_1 = Q_2$$

3) Перед решением задачи 3 уровня, вспоминаем с учащимися превращение энергии при падении тела с некоторой высоты, используя рисунок.

Учитель. Какой энергией обладает тело, находясь над поверхностью Земли?

Ученик. Потенциальной, она равна $E_p = mgh$

Учитель. Чему равна кинетическая энергия в данный момент в данной точке?

Ученик. Она равна 0

Учитель. Почему?

Ученик. т.к. тело находится в покое.

Учитель. Что происходит при падении с телом?

Ученик. Потенциальная энергия переходит в кинетическую.

Учитель. В момент касания о Землю какая энергия у тела?

Ученик. Кинетическая, равная по модулю потенциальной, если не учитывать силу трения, в процессе движения.

Учитель. Тело лежит на Земле. Чему равна потенциальная и кинетическая энергия?

Ученик. Они равны 0.

Учитель. Но энергия, согласно закону сохранения и превращения энергии не может исчезнуть.

Ученик. Энергия тела перешла во внутреннюю энергию.

Учитель. Прочтите задачу еще раз, на что израсходовалась потенциальная энергия?

Ученик. На испарение капли.

Учитель. Но ведь температура капли в начале была 20°C , что до этого с ней должно было произойти?

Ученик. Капля должна была нагреться до температуры кипения, а затем испариться.

Задачу 3 уровня нужно решать после прохождения темы « Испарение».

Существует огромное количество физических задач: расчетных, качественных, экспериментальных, но если проанализировать, то окажется, что все задачи можно разбить на несколько десятков типичных ситуаций. Ключевые ситуации позволяют наглядно показать проявление и применение физических законов; эти ситуации можно проанализировать с точки зрения математики.

Изучая любую тему по физике, учитель, прежде всего, должен сам определить, что конкретно должен усвоить ученик и выделить для себя эти моменты. Вот практически и все. А дальше творчество и мастерство учителя, как добиться понимания выше сказанного. У каждого учителя физики свои подходы.

Библиографический список

1. Гендельнштейн Л.Э., Орлов В.А., Никифоров Г.Г. «Как решать задачи по физике (основная школа). Подготовка к ГИА. М. Педагогический университет «Первое сентября», 2010.

2. Лукашик В.И., Иванова Е.В. «Сборник задач по физике 7-9», 2012.

Сведения об авторах

Несмиянова Оксана Викторовна, учитель физики КГУ СШГ № 9 (Казахстан, Актобе). E-mail: oksana.nesmianowa@yandex.kz.

УДК 372.853

Орлов А.В., Галиев А.Л.

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НА КРУЖКОВЫХ ЗАНЯТИЯХ ПО ФИЗИКЕ

В статье рассматриваются вопросы применения компьютерных программ моделирования на кружковых занятиях по физике. Приводятся достоинства наиболее перспективного программного продукта Micro Cap.

Ключевые слова: физика, физический кружок, виртуальная лабораторная работа, компьютерное моделирование, Micro Cap.

Orlov A.V., Galiev A.L.

COMPUTER MODELING IN CIRCLE CLASSES IN PHYSICS

The article deals with the use of computer simulation programs in circle classes in physics. The advantages of the most promising software product Micro Cap are given.

Key words: physics, physics circle, virtual laboratory work, computer simulation, Micro Cap.

Физика – один из наиболее интересных и увлекательных, но в то же время достаточно сложных учебных предметов в школьной программе. Одним из способов повышения интереса учащихся к изучению физики в школе является хорошо организованная внеурочная работа [1].

Внеклассная работа может осуществляться в самых разнообразных видах и формах. Одной из основных форм является предметный кружок: физический, физико-технический, технический.

Физический кружок – одна из наиболее действенных и эффективных форм внеклассных занятий. В основе кружковой работы лежит принцип строгой добровольности. Обычно кружковые занятия организуются для хорошо успевающих учащихся [2]. Однако и слабоуспевающие учащиеся иногда изъявляют желание участвовать в работе физического кружка и довольно часто весьма успешно занимаются там. Поэтому учителю физики рекомендуется включать и подобных учащихся в состав кружка. Следует лишь более внимательно относиться к таким учащимся, постараться укрепить имеющиеся у них ростки интереса к физике, проследить за тем, чтобы работа в физическом кружке оказалась для них посильной.

В процессе организации и работы физического кружка необходимо заинтересовать учащихся, показать им, что занятия на кружках не являются дублированием классных занятий. При этом следует четко сформулировать цели и раскрыть характер предстоящей работы [1].

Физика – наука как теоретическая, так и экспериментальная. Современные информационные технологии позволяют создавать модели различных физических объектов, явлений и процессов и отображать их на экране персонального компьютера с возможностью варьировать параметры. С помощью интерфейсных блоков и датчиков физических величин можно выполнять и реальный эксперимент, а также дистан-

ционно управлять реальными объектами, осуществлять автоматизированный контроль, обрабатывать результаты исследований и т.д. [3].

Особенно можно выделить виртуальные лабораторные работы, выполняемые на персональных компьютерах. Они в некотором роде являются современными учебными пособиями. Такой предмет как физика принадлежит к тем наукам, изучение которых, обязательно следует сопровождать экспериментальными исследованиями. Виртуальные эксперименты значительно ускоряют процесс освоения изучаемого материала. Даже большое количество решенных задач по физике не может заменить опыта, приобретаемого при проведении эксперимента. В свою очередь компьютер можно рассматривать как универсальный лабораторный стенд. Виртуальные эксперименты на компьютере намного дешевле, чем эксперименты с реальными элементами, приборами и оборудованием и абсолютно безопасны. Виртуальные лабораторные работы являются своеобразной аналогией, но только не заменой, лабораторного оборудования школьных предметных кабинетов, т.е. физическое и виртуальное лаборатории должны сосуществовать вместе и дополнять друг друга.

Уникальные особенности виртуальной информационной среды определяют бесспорную эффективность ее применения в любой сфере познавательной деятельности, в том числе и в проведении кружковых занятий по физике [4]. Отметим достоинства виртуального физического эксперимента. Такой эксперимент позволяет [5]:

- рассматривать сложные физические явления без их глубокого и громоздкого математического описания;
- изучать физические явления даже в тех случаях, когда проведение реального эксперимента затруднено или нецелесообразно;
- запускать, останавливать или изменять хода эксперимента с целью анализа промежуточных результатов;
- исследовать изменение физических явлений, как во времени, так и в пространстве;
- менять пространственно-временные интервалы протекания физических явлений;
- задавать необходимые параметры и условия проведения эксперимента, не опасаясь за последствия, а также безопасность и сохранность компонентов экспериментальной установки;
- визуализировать процессы протекающих физических явлений (в форме динамичных графиков, диаграмм, схем и пр.);

- проводить исследование физических явлений без влияния «извне»;
- в ходе проведения эксперимента акцентировать внимание учащихся на главных моментах изучаемых явлениях, тем самым способствуя более глубокому пониманию их сущности.

В школьном курсе физики наиболее перспективным программным продуктом для проведения кружковых занятий является электронная система моделирования Micro Cap. Данная программа может использоваться для:

- демонстрации принципиальных электрических схем;
- демонстрации условных обозначений электронных компонентов;
- объяснения принципа действия, как отдельных электрических компонентов, так и сложных схем;
- анализа полученных измерений;
- тренировки навыков и умений по построению электрических схем;
- проведения лабораторных работ;
- контроля знаний.

Micro Cap (MC) – программа для аналогового и цифрового моделирования электрических и электронных цепей с интегрированным визуальным редактором.

Первоначальные версии программы имели полностью англоязычный интерфейс, что иногда вызывал дискомфорт у пользователей в использовании. Со временем «умельцами» был разработан русификатор для программы, который при желании можно найти на просторах интернета. Правда стоит отметить, что «у некоторых пользователей после установки русификации в среде моделирования возникают проблемы с отображением кириллических шрифтов» [6].

Простой и понятный интерфейс, минимальные системные требования и огромный функционал стали основными пунктами популярности MC. Работать с программой Micro Cap довольно таки просто: вначале создается электрическая цепь, затем задаются параметры для анализа и в конце изучаются полученные результаты. Программа самостоятельно составляет уравнения цепи и производит их расчёт. Любое изменение схемы или параметров элементов цепи приводит к автоматическому обновлению результатов.

В процессе моделирования в МС можно осуществлять следующие виды анализов: анализ переходных процессов, анализ частотных характеристик, анализ передаточных характеристик по постоянному току, расчеты по постоянным и переменным токам, анализ чувствительности по постоянному току, анализ малосигнальных передаточных функции, анализ нелинейных искажений и многих других.

Компания, производившая Misco Cap, закрылась в июле 2019 года и программное обеспечение теперь бесплатное [7].

Таким образом использование компьютерных технологий на кружковых занятиях по физике имеет много возможностей для развития творческого интеллекта учащихся, формирование их предметной и информационной компетентности. Развитие образования предусматривает внедрение в учебно-воспитательный процесс новейших педагогических технологий, систем информационного обеспечения на базе телекоммуникационных сетей с доступом к Internet.

Высокий уровень развития компьютерной техники и информационных технологий вызвал радикальные изменения концепции и технологии коммуникации и обработки информации, оказывают значительное влияние на все сферы общественной жизни, в том числе и на образование.

Современное поколение молодых людей имеет возможность использовать широкий спектр средств коммуникации, обработки и хранения информации: персональные компьютеры, подключенные к Интернет, кабельное и спутниковое телевидение, сотовая связь, Web-технологии, дистанционное и виртуальное обучение, доступ через Интернет к крупнейшим библиотекам мира, электронную почту, непосредственное общение со всем миром в реальном режиме. Все это не может не вызвать изменений в сфере образования и требует от всех участников образовательного процесса освоения информационно-коммуникационных технологий обучения и навыков пользования ими.

Библиографический список

1. Организация внеурочной деятельности на уроках физики <https://uchportal.ru>.
2. Кружковые занятия по математике и методика её проведения <http://solideducator.ru>.
3. Разработка уроков с использованием программы Electronics Workbench <http://docplayer.ru>.

4. Виртуальный эксперимент в системе преподавания физике <http://infopedia.su>.

5. Оспенников Н.А. Школьный физический эксперимент в условиях развития компьютерных технологий обучения // Вестник Пермского государственного гуманитарно-педагогического университета. Серия: Информационные компьютерные технологии в образовании. 2006. № 2. С. 48-77.

6. Разевиг В.Д. Схемотехническое моделирование с помощью Micro-Cap 7. – М.: Горячая линия-Телеком, 2003. – 152 с.

7. Micro-Cap – Википедия <https://ru.wikipedia.org>.

Сведения об авторах

Орлов Алексей Вениаминович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Общей и теоретической физики Стерлитамакского филиала Башкирского государственного университета (Россия, г. Стерлитамак). E-mail: orlov_alexey81@mail.ru.

Галиев Анвар Лутфрахманович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Общей и теоретической физики Стерлитамакского филиала Башкирского государственного университета (Россия, г. Стерлитамак). E-mail: galievanvar@mail.ru.

УДК 004:378

Павлов О.Ю., Гизатулин Р.М., Зарипов С.Э.

ОСОБЕННОСТИ МЕТОДА И ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ АДАПТИВНОГО ОБУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ГЕЙМИФИКАЦИИ

Целью данной работы является создание обобщенной темы для обучения обработке с массивами информации на языках программирования C++, Python и Паскаль. Рассмотрена тема изучения массивов информации для обучения студентов по направлению 09.03.02 по дисциплине «Основы программирования».

Ключевые слова: обучение, образовательный процесс, методики и подходы изучения структур данных.

Pavlov O. Yu., Gizatulin R.M., Zaripov S.E.

FEATURES OF THE METHOD AND FUNCTIONAL STRUCTURE OF ADAPTIVE LEARNING BASED ON THE GAMIFICATION METHOD

The purpose of this work is to create a generalized topic for teaching processing with arrays of information in the C ++ and Pascal programming languages. The topic of studying information arrays for teaching students in the direction 09.03.02 in the discipline "Fundamentals of Programming" is considered.

Keywords: training, educational process, methods and approaches to studying data structures.

В практике обучения программированию приходится сталкиваться с различными языками программирования и отличительными особенностями этих языков. Большое количество тем лекций и практик посвящено формированию знаний в области основных структур данных. Однако появляются новые дисциплины, в которых могут использоваться другие технологии. Современные подходы к обучению и обработке массивов данных используются в обработке больших данных и интеллектуальных системах [2, 3, 4, 7].

Целью данной работы является создание обобщенной темы для обучения обработке с массивами информации на языках программирования C++, Python и Паскаль.

Основными задачами работы являются:

- разработка и анализ темы дисциплины «Основы программирования» и «Программирование на языках высокого уровня»;
- создание обучающей программы на языках программирования C++ и Паскаль.

Для примера рассмотрим тему изучения массивов информации. Задачей современных компьютеров является обработка больших объемов данных. Чтобы легче было работать с большими объемами данных, используются такие структуры, как массивы и являются важнейшими средствами языка, применяемыми во многих программах. Их использование очень упрощает работу с большим количеством информации.

Массив является хорошим способом хранения связанных элементов данных для большего удобства и эффективности программирования. Объединяя массивы и циклы в программе можно написать небольшое число команд, которые обрабатывают большой объем

данных. Выполнение тех же задач с использованием отдельных переменных может потребовать очень большую программу с использованием большого количества команд [1, 5, 6, 7].

Массивы могут быть как статическими, так и динамическими. При статическом массиве программист должен знать его размер, и, следовательно, указать сразу размер массива. Если же программист не знает определенный размер, то ему нужно выделять память с запасом, чтобы ее хватило для программы. При динамическом массиве, размер которого определяется при выполнении программы, тогда же происходит и выделение в памяти.

Еще массивы бывают одномерными и двумерными. Количество индексов элементов массива определяет размерность массива. В одномерных массивах при обращении к элементу используется только один порядковый номер (пример: таблица с одной строкой или числовая последовательность), а в двумерном массиве используется два индекса (пример: таблица, в которой номер строки соответствует первому индексу, а номер столбца – второму индексу).

Рассмотрим массив на языке программирования Python.

В языке программирования python перед тем как создать массив, нужно добавить библиотеку, отвечающий за работу массива. Для этого нужно добавить строку “ `from array import *` ” в файл программы. Это является некой особенностью языка python.

```
A = array('i', [1, 2, 5, 0])
```

```
A.insert(5,3)
```

```
A.pop(4)
```

```
print(len(A))
```

С помощью `array` добавляется новый набор данных.

`A` – название массива

`'i'` – тип переменной, в нашем случае `'i'` – это целочисленный, также можно использовать `'c'` – символьный или `'f'` – с плавающей точкой

`[]` – значения массива.

`A.insert(5,10)` – позволяет добавить новый элемент в массив, первое (5) показывает индекс нового элемента, а второе (10) представляет то значение которое нужно добавить.

`A.pop(4)` – удаляет элемент с индексом 4. После выполнения этой операции все содержимое массива сдвигается так, что количество элементов будет совпадать с доступными ячейками памяти.

Еще одной особенностью языка python в отличие от Паскаля является то, что

размерность может спокойно менять без никаких проблем, а в Паскале же нет, там либо сами указываем или же программа сама ставить произвольную размерность (само собой с помощью команды).

`print(len(A))` – позволяет узнать длину массива (размерность массива).

Пример кода.

```
L=6
```

```
P =[0]*L
```

```
for i in range(L):
```

```
    P[i]=int(input())
```

```
for i in range(0,L-1):
```

```
    k=i
```

```
    for j in range (i+1,L):
```

```
        if (P[j]P[k]):
```

```
            k=j
```

```
    P[i], P[k]= P[k],P[i]
```

```
for i in range(0,L):
```

```
    print(P[i],end=' ')
```

С помощью данной программы мы находим наибольший элемент из шести элементов.

Рассмотрим массив на языке программирования Паскаль.

(Основные элементы)

Объявление массива в языке Паскаль происходит следующим образом:

```
var A: array [1 .. N] of integer;
```

```
A[1] = 1;
```

```
...
```

```
A[N] = N; //A - имя массива
```

`var, array, of` – служебные слова

`[1 .. N]` – количество элементов массива (размерность массива)

`Integer` – показывает к какому типу относиться массив (в этом примере целочисленному)

`A []` – индексация к элементу массива

`A [1] = 5` - присвоение числа к первому элементу массива.

Объявить размер можно еще через константу: `const N=6;`

Объявление двумерного массива выглядит следующим образом:
Var A: array [1..N, 1..M];
A[i, j] – это элемент, находящийся в j -ом столбце i- ой строки этой матрицы (массива).

Пример кода.

```
const N = 7;  
var a: array[1..N] of integer;  
i: integer;  
for i:= 1 to N do begin  
    write('a[', i, ']=', );  
    read (a[i]);end;  
for i:=1 to N do a[i]:= a[i]+2;  
writeln(' Массив A: ');  
for i:= 1 to N do  
    write (a[i] : 2);end.
```

С помощью этой программы мы создаем одномерный массив с размерностью 7. Ввод чисел происходит с клавиатуры. Суть задачи заключается в том, что каждый элемент массива увеличивается на 2 и такой массив выводится.

Анализ применения программы показал, что у обучаемых существенно расширяется кругозор и понимание изучаемой структуры данных. Применение данной структуры при решении задач заметно возросло.

Таким образом, рассмотрен процесс создания таких структур данных, как массивы на языках программирования *C++*, *Python* и *Паскаль*. Предложено использовать данные программы для обучения студентов по направлению 09.03.02 - Информационные системы и технологии по дисциплине «Основы программирования» и «Программирование на языках высокого уровня».

Библиографический список

1. Давыдова, Н. А. Программирование: учебное пособие / Н. А. Давыдова, Е. В. Боровская. – 4-е изд. – Москва: Лаборатория знаний, 2020. – 241 с. – ISBN 978-5-00101-788-2.
2. Дегтярев Г.Л., Сагдатуллин А.М. Разработка системы нейронечеткого прогнозирования концентрации содержащихся примесей при транспортировке нефтяной эмульсии со скважин // Математические методы в технологиях и технике. 2021. № 2. С. 110-113.
3. Дегтярев Г.Л., Сагдатуллин А.М. Разработка математических моделей прогнозирования процессов добычи и транспорта нефти в

условиях неопределенности // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). 2020. № 54. С. 71-75.

4. Тюгашев А.А. Основы программирования. Часть I. – СПб: Университет ИТМО, 2016. – 160 с.

5. Сагдатуллин А.М. Применение методов нечеткой логики и нейронных сетей для автоматизации технологических процессов в нефтегазовом машиностроении и повышения эффективности добычи нефти // Интеллектуальные системы в производстве. 2021. Т. 19. № 2. С. 83-89.

6. Сагдатуллин А.М. Применение новой информационной модели при обучении моделированию производственных объектов машиностроения в условиях аддитивного производства // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2020. Т. 76. № 1. С. 94-98.

7. Сагдатуллин А.М. Применение программы `siemensnx` в практико-ориентированном подходе обучения для подготовки высококвалифицированных кадров // Целевая подготовка кадров: направления, технологии и эффективность. Материалы международной научно-практической конференции. 2019. С. 206-208.

Сведения об авторах

Павлов Олег Юрьевич

Гизатулин Рамазан Марсович

Зарипов Сулейман Эльдарович

УДК 004:378

Павлов О.Ю., Семенов К.С.

ОСОБЕННОСТИ МЕТОДА И ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ АДАПТИВНОГО ОБУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ГЕЙМИФИКАЦИИ

Статья посвящена исследованию вопросов усовершенствования методик обучения в высшем образовательном учреждении. С этой целью разработана функциональная структура адаптивного обуче-

ния на основе предлагаемого метода. Предложена реализация и разделение этапов при реализации процесса геймификации.

Ключевые слова: адаптивное обучение, образовательный процесс, геймификация, методики и подходы геймификации в обучении.

Pavlov O.Yu., Semenov K.S.

FEATURES OF THE METHOD AND FUNCTIONAL STRUCTURE OF ADAPTIVE LEARNING BASED ON THE GAMIFICATION METHOD

The article is devoted to the study of the issues of improving teaching methods in a higher educational institution. For this purpose, a functional structure of adaptive learning has been developed based on the proposed method. The implementation and separation of stages in the implementation of the gamification process is proposed.

Keywords: adaptive learning, educational process, gamification, methods and approaches of gamification in education.

Образовательный процесс меняется в процессе получения все новых знаний и методов. Все большую роль занимают игровые техники и смешанные методики передачи информации. Знания составляют основу таких методов, которые можно охарактеризовать как отражение действительности в эмпирическом и теоретическом контекстах.

Понятие геймификации стало известно в 2002 году на основе работ Пеллинга Н. Затем быстро набрало популярность с применением информационных и коммуникационных технологий. В настоящее время тренажеры и компьютерные программы виртуальной реальности для промышленности и производства позволяют выполнять различные манипуляции с производственным оборудованием [1, 2, 6].

На основе геймификации возможно построение систем обучения (рисунк 1).

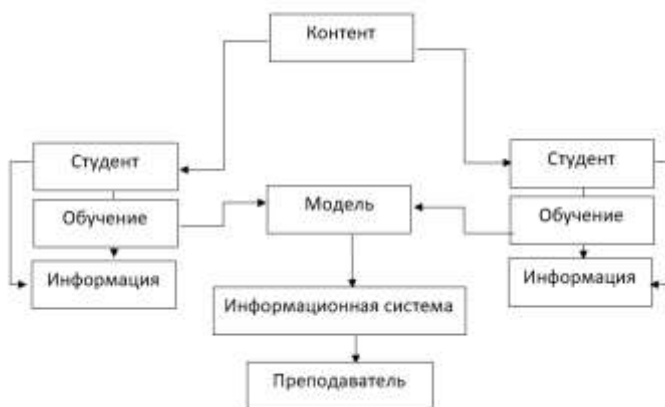


Рис. 1. Функциональная структура адаптивного обучения на основе предлагаемого метода

На рисунке 2 показаны основные компоненты в реализации предлагаемой методики.

Предлагаемая методика позволит отработать многие аспекты повторяющейся работы, может быть использована для понимания и изучения естественно-научных дисциплин. С этой целью, например, возможно добавление развлекательных блоков в образовательный процесс. Это улучшит мотивацию к изучению темы или модуля дисциплины у обучаемых, разовьёт вариативность мышления при решении определенных задач [3, 4, 5].

Основными компонентами методики являются:

- Дифференцированное закрепление знаний.
- Модель обучаемого.
- Индивидуальный подход в зависимости от темпа обучающегося.
- Этапы обучения и шаги [6, 7].

Также, возможно использовать различные методы «умных» механизмов для формирования тем и модулей [2, 3, 5].



Рис. 2. Реализация и разделение этапов при реализации процесса геймификации

В таблице 1 приведено сравнение и отличия предлагаемого метода и других техник.

Таблица 1 – Сравнение предлагаемого метода и других техник

Критерий сравнения	Традиционный подход	Ролевая игра	Деловая игра	Симулятор	Геймификация
Спонтанность	-	+	-	-	-
Наличие правил	+	-	+	+	+
Наличие цели	+	-	+	+	+
Структура	+	-	+	+	+
Реализм	-	-	+	+	+
Системность	-	-	-	+	+

Таким образом, рассмотрен процесс обучения, основанный на методе геймификации, проанализирована функциональная структура

адаптивного обучения на основе предлагаемого метода и механизм ее работы, предложена реализация и разделение этапов при реализации процесса геймификации. Сравнение предлагаемого метода и других техник показало, что есть ряд преимуществ. Однако, для их достижения необходима специализированная программная среда.

Библиографический список

1. Варенина Л.П. Геймификация в образовании // Образование и педагогические науки. Историческая и социально-образовательная мысль. Том 6, № 6, Часть 2, 2014. С. 314-317.
2. Дегтярев Г.Л., Сагдатуллин А.М. Разработка системы нейронечеткого прогнозирования концентрации содержащихся примесей при транспортировке нефтяной эмульсии со скважин // Математические методы в технологиях и технике. 2021. № 2. С. 110-113.
3. Дегтярев Г.Л., Сагдатуллин А.М. Разработка математических моделей прогнозирования процессов добычи и транспорта нефти в условиях неопределенности // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). 2020. № 54. С. 71-75.
4. Орлова О.В., Титова В. Н. Геймификация как способ организации обучения // Вестник ТГПУ (TSPU Bulletin). 2015. 9 (162).
5. Сагдатуллин А.М. Применение методов нечеткой логики и нейронных сетей для автоматизации технологических процессов в нефтегазовом машиностроении и повышения эффективности добычи нефти // Интеллектуальные системы в производстве. 2021. Т. 19. № 2. С. 83-89.
6. Семенов К.С., Сагдатуллин А.М. Разработка информационной системы для поддержки образовательного процесса на основе метода геймификации // Математические методы в технологиях и технике. 2021. № 2. С. 123-126.
7. Дегтярев Г.Л., Сагдатуллин А.М. Разработка системы нейронечеткого прогнозирования концентрации содержащихся примесей при транспортировке нефтяной эмульсии со скважин // Математические методы в технологиях и технике. 2021. № 2. С. 110-113.

Сведения об авторах

Павлов Олег Юрьевич
Семенов Кирилл Сергеевич

Полякова Л.В.

**РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ ДИФФЕРЕНЦИРОВАННЫХ
ЗАДАНИЙ ПО КОНЕЧНОМУ РЕЗУЛЬТАТУ И ЧЕРЕЗ ДИАЛОГ
НА УРОКАХ ФИЗИКИ**

В статье рассматриваются виды дифференцированных заданий по конечному результату и через диалог.

Ключевые слова: дифференцированный подход, дифференциация по конечному результату или ответу, дифференциация через диалог.

Polyakova L.V.

**DEVELOPMENT AND APPLICATION OF DIFFERENTIATED
TASKS BASED ON THE FINAL RESULT AND THROUGH
DIALOGUE IN PHYSICS LESSONS**

The article discusses the types of differentiated tasks based on the final result and through a dialogue.

Keywords: Development and application of differentiated tasks based on the final result and through dialogue in physics lessons.

Известно, что каждый учащийся обладает определенными способностями, от которых зависит не только его дальнейший успех, но и познавательный интерес к предметам. В современном образовании существуют технологии позволяющие «учитывать возможности каждого учащегося, выявлять пробелы в его знаниях, проверять уровень усвоения нового материала и дает возможность каждому учащемуся углубить свои знания» [2]. Одной из таких образовательных технологий является технология дифференцированного подхода.

Применение дифференцированного подхода на уроках позволяет соотнести уровень задания, предложенный учащемуся с его способностями с учетом времени на его выполнение.

Дифференцированный подхода в обучении решает следующие задачи:

1. «Достижения обязательных результатов каждым учащимся в соответствии с его реальными возможностями.
2. Совершенствование творческого, ценностного, познавательного, художественного, коммуникативного потенциалов.

3. Восприятия знаний в соответствии с реальными возможностями и ориентацией на «сферу ближайшего развития» [2].

Дифференцированный подход позволяет учителю использовать различные формы работы: индивидуальные, парные, групповые в зависимости от потребностей каждого ученика.

Достичь успеха в процессе обучения возможно тогда, когда учитель знает и учитывает особенности детей и создает на уроке все необходимые условия для его дальнейшего развития.

Эффективность стратегий дифференциации определяется планированием урока. Основные шаги при планировании урока с дифференцированным подходом:

1. Определите, что вы хотите, чтобы ваши учащиеся узнали на уроке и могли бы выполнить.

2. Подумайте, что вы можете сделать, чтобы помочь учащимся прогрессировать и успешно продолжать обучение.

3. Оцените первоначальные способности и знания учащихся с помощью письменных работ, тестового материала, обсуждения в классе.

4. Учитывайте при работе с учащимися два наиболее важных фактора, которые помогают им учиться более эффективно: что они уже знают и как они обрабатывают информацию.

5. Дифференциация требует, чтобы учитель изменял свои подходы, использовал различные стили обучения, учитывал способности и интересы учащихся.

Дифференциация по конечному результату или ответу

Дифференциация по результату – это техника, посредством которой все учащиеся выполняют одну и ту же задачу, но ожидается и принимается множество результатов. Для всех обучаемых используется один и тот же материал или стимул, ставятся одинаковые задачи для всех в группе. Дифференциация достигается за счет того, что отвечающие исходят из их собственного уровня способностей - совершенно разные результаты/продукты следуют из одинаковой задачи или проводимой работы.

Этот метод работает лучше всего с заданиями открытого типа, когда у обучаемых есть возможность сделать что-то индивидуальное. Главное преимущество этого вида дифференциации состоит в том, что учеников не обязательно группировать в начале выполнения задания.

Предмет: <i>физика</i>	Класс: 9	Тема урока: <i>Виды колебаний</i>
<i>Цель обучения:</i> - приводить примеры свободных и вынужденных колебаний и объяснять причины возникновения колебаний в различных колебательных системах		
<i>Задание:</i> Обсудите примеры колебаний, представленные в задании: 1. Примерами свободных колебаний являются: колебания шарика на дне сферической чаши является примером свободных колебаний; качели после однократного толчка совершили 5 колебаний за 30 секунд ; колебания груза на пружине после ее растяжения; раскачивание ветки дерева на ветру; 2. Примерами вынужденных колебаний служат: движение поршня в цилиндре; колебания струны после ее отклонения. игла в швейной машинке делает 300 полных колебаний за 30 секунд; движение качелей под действием постоянных толчков. <i>Критерии оценивания:</i> 1. Подтвердите или опровергните выбранный вами факт, приведите доказательства. 2. Дайте определение свободных/ вынужденных колебаний 3. Приведите свои примеры свободных/ вынужденных колебаний. 4. Рассчитайте частоту колебаний, циклическую частоту качели/иглы 5. Время презентации 2 минуты.		



Использование на уроках задания «Вопрос-Ответ» позволяет осуществить дифференциацию по конечному результату или ответу. Учащимся предлагается картинка (рисунок, схема), которая непосредственно связана с темой урока, и по которой учащиеся составляют вопросы, а другие учащиеся класса должны дать ответ на поставленный вопрос.

В ходе таких заданий учащиеся

– делают анализ информации по рисунку, учатся извлекать информацию из рисунков, схем, таблиц.

– развивают дивергентное мышление, учатся генерировать идеи и находить не один способ решения проблемы, а несколько.

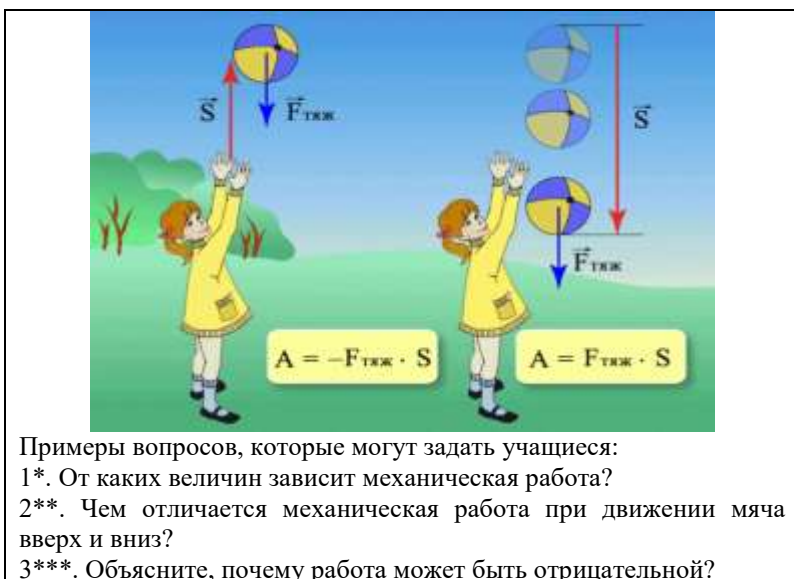
– используя свой жизненный опыт, находят ответы на поставленные вопросы.

– учатся составлять вопросы высокого уровня и грамотно формулировать ответы.

Например:

Предмет: <i>физика</i>	Класс: 7	Тема урока: <i>Атмосферное давление, измерение атмосферного давления.</i>
<i>Цель обучения:</i> объяснять природу атмосферного давления и способы его измерения.		
<i>Задание:</i> задайте вопрос по рисунку и дайте ответ.		
Примеры вопросов, которые могут задать учащиеся:		
1*. Как атмосферное давление зависит от погодных условий, времени года?		
2**..Влияет ли атмосферное давление на самочувствие живых организмов?		
3***. Объясните, почему в солнечную погоду атмосферное давление повышается?		

Предмет: <i>физика</i>	Класс: 7	Тема урока: <i>Механическая работа.</i>
<i>Цель обучения:</i> объяснять физический смысл механической работы.		
<i>Задание:</i> задайте вопрос по рисунку и дайте ответ.		



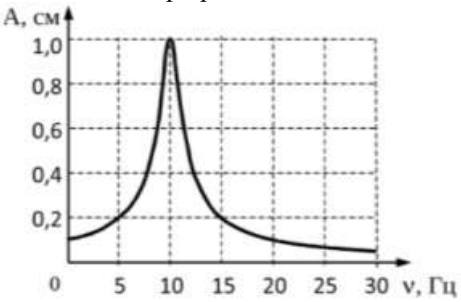
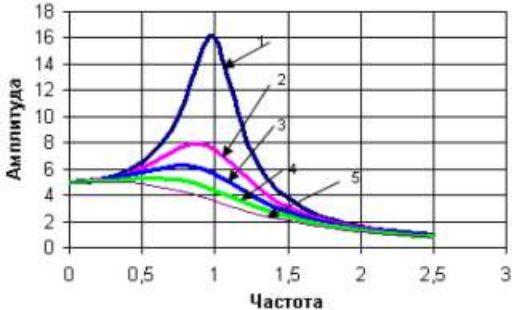
Дифференциация через диалог

Самый важный ресурс для любого обучающегося не бумага и не электронный гаджет, а человеческий. Дифференциация через диалог делает акцент на роли учителя и беседы, которая происходит между учителем и учеником. Есть различные аспекты дифференциации через диалог.

Сложность используемого языка должны варьироваться для различных учащихся. Для менее способного ученика может потребоваться подробное объяснение на простом языке. Более способный ученик требует словесного диалога на более сложном уровне. Всем учащимся нужна соответствующая обратная связь в рамках диалога. Опытный учитель, управляющий классом, побуждает и поощряет учащихся комментариями, соответствующими способностям и уровню совершенного каждым учеником прогресса.

Например:

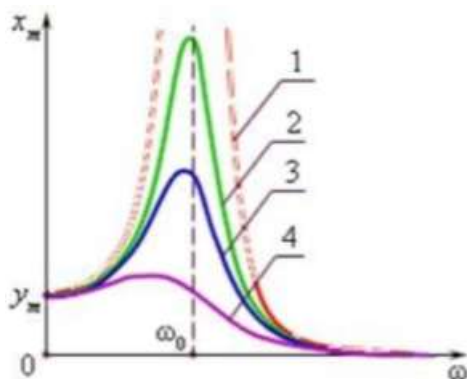
Предмет: <i>физика</i>	Класс: 9	Тема урока: <i>Резонанс</i>
А	Вопросы для диалога: Что такое резонанс? При каком условии наступает резонанс? Приведите примеры данного явления.	

	Решите задачу: на графике изображена резонансная кривая (зависимость амплитуды установившихся колебаний от частоты вынужденной силы) математического маятника. Определите резонансную частоту и амплитуду колебаний этого маятника при резонансе.  The graph shows a resonance curve for a mathematical pendulum. The vertical axis represents amplitude A in cm, ranging from 0 to 1.0 with major grid lines every 0.2 units. The horizontal axis represents frequency ν in Hz, ranging from 0 to 30 with major grid lines every 5 units. The curve starts at approximately 0.15 cm at 0 Hz, rises to a sharp peak of 1.0 cm at 10 Hz, and then decays back towards 0.15 cm at 30 Hz.
В	Вопросы для диалога: 1. Вставьте пропущенные слова: При совпадении частоты 1. _____ с собственной частотой 2. _____ амплитуда колебаний 3. _____. 2. На рисунке представлены резонансные кривые для различных значений сопротивления среды. Какая из резонансных кривых соответствует большому сопротивлению? Ответ поясните. Резонансная кривая  The graph shows five resonance curves labeled 1 through 5. The vertical axis is 'Амплитуда' (Amplitude) from 0 to 18, and the horizontal axis is 'Частота' (Frequency) from 0 to 3. All curves peak at a frequency of 1. Curve 1 has the highest peak (amplitude ~16). As the curve number increases, the peak amplitude decreases and the curve becomes broader. Curve 5 has the lowest and broadest peak (amplitude ~4).
С	Ответьте на вопросы: 1) Строительные компании Японии устанавливают на крыше небоскребов огромные резервуары с водой. Для

чего это делается?

2) Почему низкочастотные колебания сравнимые с колебаниями сердца вредны для здоровья человека?

3) На рисунке представлены резонансные кривые для различных значений сопротивления среды. Поясните график № 1.



Планируя урок, учитель должен помнить о том, чтобы каждый ученик работал в полную силу своих способностей, чувствовал уверенность в себе и прочно усваивал учебный материал. Для этого и необходим дифференцированный подход в обучении.

Выбор вида дифференциации зависит, прежде всего, от целей обучения и типа задания. Дифференцированные задания могут разрабатываться не только по уровню сложности, но и количеству времени отведенному на выполнение одного и того же задания, как способным так и слабым учащимся.

Необходимо знать, что процесс дифференциации должен быть гибким и подвижным, позволит учителю в процессе обучения подходить индивидуально как к каждому ученику, так и способствовать общей активизации класса. Для успешной реализации принципа дифференциации необходимо:

Знание учителем индивидуально-психологических особенностей учащихся.

Умения правильно организовать работу всего класса с дифференцированным подходом к каждому учащемуся.

Библиографический список

1. Акимова Т.А., Полякова Л.В., Трубникова Л.В. Дифференцированный подход на уроках биологии и физики – Астана: АОО «Назарбаев Интеллектуальные школы» Центр педагогического мастерства, 2017. – 64 с.

2. Яковлева, Е.В. Организация дифференцированного подхода в процессе усвоения знаний младшими школьниками / Е. В. Яковлева // Начальная школа. – 2004. – № 5. – С. 34–46

Сведения об авторах

Полякова Лариса Викторовна, учитель физики КГУ СШГ № 9 (Актобе, Казахстан). E-mail: lara.polyakova.19_0@mail.ru.

УДК 378.147

Рабчук Л.В.

РЕЗУЛЬТАТЫ АНКЕТИРОВАНИЯ СТУДЕНТОВ ПО ВОПРОСУ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ

В работе приведены результатов опроса студентов о проблемах и качестве обучения в дистанционном формате.

Ключевые слова: анкетирование студентов, дистанционное обучение.

Rabchuk L.V.

QUESTIONNAIRE RESULTS OF STUDENTS ON DISTANCE LEARNING

The paper presents the questionnaire results of a survey of students about the problems and quality of distance learning.

Key words: questioning of students, distance learning.

В 2020 году студенты высших учебных заведений РФ были переведены на дистанционный формат обучения. Данный формат имеет ряд особенностей, поскольку предполагает широкое использование специальных технических средств и программного обеспечения [4-6]. Министерством науки и высшего образования РФ, а также многими

вузами были проведены онлайн-опросы студентов о вынужденном дистанционном обучении [1-3]. В публикации рассмотрены результаты опроса студентов Уфимского государственного авиационного технического университета (УГАТУ) о дистанционном обучении в целом и, в частности, по дисциплине «Физика» за период с марта 2020 года по январь 2021 года. В анкетировании участвовали студенты второго курса пяти учебных групп факультета авионики, энергетики и инфокоммуникаций (АВИЭТ) и одна группа Института авиационных технологий и материалов (ИАТМ) общей численностью 106 человек. Принявшие участие в анкетировании студенты в течение первого семестра обучались очно, второй и третий семестры – преимущественно в дистанционном формате. Студентам было предложено ответить на 20 вопросов анкеты, касающихся различных аспектов дистанционного обучения. Целью опроса было ознакомление с адаптацией студентов к удаленному обучению, изучение положительных и отрицательных сторон дистанта, проверка мотивации получения высшего образования, оценка перспектив применения дистанционного формата в техническом вузе.

Результаты анкетирования показали, что 98 % студентов хорошо адаптировались к условиям дистанционного обучения, но 10 % из них отметили, что дистанционный формат обучения для них не удобен и крайне сложен. Более 70% опрошиваемых указали на увеличение в целом учебной нагрузки в период карантина. Среди трудностей в процессе дистанционного обучения студенты выделили сложность выполнения практических заданий без непосредственного очного контакта с преподавателем и большой объем задаваемой самостоятельной работы (82 %), а также недостаточное количество лекционного материала (11 %).

В условиях дистанционного обучения студенты должны быть оснащены персональным компьютером с видеокамерой и микрофоном или ноутбуком, а в некоторых случаях требуется установка на них специальных программ, позволяющих, например, выполнять виртуальные лабораторные работы. Опрос студентов показал, что практически все из них для дистанционной работы использовали по два типа устройств (ноутбук, мобильный телефон), а каждый третий студент дополнительно и персональный компьютер. В качестве технических проблем студенты указали на необходимость постоянного доступа к Интернету, при этом каждый второй отметил низкую скорость Интернета (преимущественно студенты, проживающие в районах

Башкортостана), 15% студентов столкнулись с перебоями в процессе воспроизведения материала, а 10 % отметили ухудшение обратной связи с преподавателем при работе в дистанционном формате.

Среди форм работ, чаще всего используемых преподавателями различных дисциплин УГАТУ при электронном обучении, студенты указали проведение видео-занятий, размещение учебных материалов, выдачу заданий для самостоятельного выполнения, онлайн-тестирование. Все студенты в целом удовлетворены организацией занятий в дистанционной форме по всем учебным дисциплинам и отмечают, что им не требовалась помощь по техническому сопровождению дистанционного обучения. В то же время студенты считают целесообразным расширение базы виртуальных лабораторных работ по дисциплинам и увеличение объема дополнительного материала по изучаемым на занятиях темам.

В качестве положительного момента учебного процесса в дистанционном формате студенты считают использование современных технологий обучения, возможность построения индивидуального темпа обучения с использованием видеозаписей занятий и презентаций, а также низкий риск заражения инфекцией. Среди преимуществ электронного обучения выделены технологичность процесса обучения с использованием информационных технологий, гибкость учебного процесса, легкость обновления содержания и возможность архивации учебного материала, обучение в комфортной домашней обстановке. Большинство студентов отметили упрощение сдачи зачета или экзамена в дистанционной форме по сравнению с очным форматом обучения и более высокий итоговый результат на зачете или экзамене.

Уровень мотивации студентов к обучению в рамках дистанционной формы у 81 % опрошиваемых не изменился, а у 17% увеличился. Как показал опрос, оптимальным для получения высшего образования студенты считают либо очное обучение, либо сочетание очного и дистанционного обучения с компонентой дистанционного обучения от 20 до 50% от общего количества часов, выделяемых рабочими программами на конкретные учебные дисциплины. Переход на полностью дистанционный формат обучения 83 % из числа опрошиваемых студентов считает нецелесообразным, поскольку он снизит качество обучения и, как следствие, заинтересованность работодателя в выпускнике технического вуза.

Таким образом, анкетирование студентов двух факультетов УГАТУ в целом коррелирует с результатами социологического ис-

следования «Мнение студентов вузов России о вынужденном дистанционном обучении» [1]. Опрос показывает, что мотивация студентов к получению высшего технического образования остается высокой и очное обучение для них остается приоритетным. Дистанционные образовательные технологии, по мнению студентов, в техническом вузе следует применять только как дополнительную форму обучения.

Библиографический список

1. Алешковский И.А., Гаспаршвили А.Т., Крухмалева О.В., Нарбут Н.П., Савина Н.Е. Студенты вузов России о дистанционном обучении: оценка и возможности // Высшее образование в России. 2020. Т. 29. № 10. С. 86-100.

2. Гафуров И.Р., Ибрагимов Г.И., Калимуллин А.М., Алишев Т.Б. Трансформация обучения в высшей школе во время пандемии: болевые точки // Высшее образование в России. 2020. Т.29. № 10. С. 101-112.

3. Денисова О.А., Кун О.А., Денисов А.П. Дистанционное образование глазами студентов (по материалам анкетирования) // Современные проблемы науки и образования – 2020. – № 4; URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=30014>

4. Ильин А.А. Особенности дистанционного обучения студентов вузов по техническим направлениям подготовки // Образование и педагогика: теория и практика: материалы Всеросс. науч.-практ. конф. – Чебоксары: ИД «Среда». 2020. С. 34-36.

5. Носкова Т.Н. Информационные технологии в образовании. – М.: Изд-во «Лань». 2016. 296с.

6. Шаров В.С. Дистанционное обучение: Форма, технология, средство // Известия Российского государственного педагогического университета им. А.И. Герцена. - СПб: Изд-во РГПУ им. А.И. Герцена. 2009. № 94. С. 236-239.

Сведения об авторах

Рабчук Людмила Васильевна, кандидат химических наук, доцент УГАТУ (Уфа). E-mail: rabtchuk_ludmila@mail.ru.

Свирская Л.М.

ИЗУЧЕНИЕ ФИЗИКИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ НА ОСНОВЕ ЗАДАЧ

В статье рассматривается методика изучения физики элементарных частиц на основе задач от операций симметрии до Стандартной модели.

Ключевые слова: физика элементарных частиц, задачи, кварковая структура адронов, фундаментальные взаимодействия.

Svirskaya L.M.

STUDY OF THE PHYSICS OF ELEMENTARY PARTICLES ON THE BASIS OF TASKS

The article discusses a methodology for studying elementary particle physics based on tasks from symmetry operations to the Standard Model.

Key words: physics of elementary particles, tasks, hadron quark structure, fundamental interactions.

Физика элементарных частиц (ФЭЧ) является составной частью дисциплины «Физика атомного ядра и элементарных частиц» (ФЯЭЧ) – завершающего раздела курса «Основы теоретической физики». В условиях небольшого количества часов, выделяемых на изучение ФЯЭЧ, целесообразно лекции посвятить преимущественно вопросам физики ядра, а физику элементарных частиц изучать в виде задач на практических и лабораторных занятиях. При этом предлагаемый для изучения материал структурируется в виде отдельных «ступенек», обеспечивающих постепенное восхождение от основных характеристик частиц, операций симметрии, кварковой структуры адронов до теории Великого объединения фундаментальных взаимодействий.

Такой «ступенчатый» метод изучения ФЭЧ (stepped – технология) продемонстрировал свою эффективность как в процессе очных занятий, так и в дистанционном формате. Он предусматривает

– проведение подробных вычислений на доступном для студентов уровне, избегая догматического изложения материала и использования готовых табличных данных;

– организацию активной самостоятельной работы студентов, позволяющей подняться с уровней «Знать» и «Уметь» на уровень владения материалом;

– формирование умения осознать значимость достижений современной ФЭЧ в соответствии с характеристикой Д. Данина: «У высот науки то же свойство, что у горных высот: там захватывает дух» [3].

Представим краткое содержание курса ФЭЧ, структурированное в виде отдельных тематических «ступенек», для бакалавров, обучающихся по направлению 44.03.05 Педагогическое образование (физика с дополнительной специальностью).

Тема 1. Классификация частиц. Операции симметрии

1. Лептоны, адроны, переносчики взаимодействий.
2. Операция пространственной инверсии.
3. Операция зарядового сопряжения.
4. Операция обращения времени.

Тема 2. Формализм изотопического спина

1. Изотопический спин.
2. Барионный заряд. Странность. Гиперзаряд.
3. Формула Гелл-Манна-Нишииджимы.

Тема 3. Изотопические и унитарные мультиплеты

1. Операторы изотопического спина. Изомultiплеты. Построение весовых диаграмм.

2. Унитарные мультиплеты

– октет барионов со спином $1/2$,

– октет мезонов со спином 0,

– декуплет барионных резонансов со спином $3/2$.

Симметрия рассчитанных весовых диаграмм позволяет студентам высказать гипотезу о внутренней структуре адронов, которая проверяется на следующем занятии в рамках кварковой модели.

Тема 4. Кварки u , d , s

1. Определение основных характеристик кварков.
2. Расчёт кваркового состава протона и нейтрона.
3. Кварковый состав мезонов и гиперонов.
4. Кварковая структура барионных резонансов.

Тема 5. Цвет кварков и глюоны

1. Обнаружение противоречия принципу Паули. Промежуточная квантовая статистика или дополнительная степень свободы? Цветовой заряд.

2. Глюоны.

3. Понятие о квантовой хромодинамике (КХД).

Тема 6. Кварки s , b , t

1. «Ноябрьская революция» 1974 г. Чармоний.

2. Открытие J/Ψ – и Υ – мезонов. Ботомоний.

3. Расчёт характеристик кварков s , b , t и обобщение формулы Гелл-Манна – Нишиджимы.

4. Кварк-лептонная симметрия.

5. Пентакварки.

6. Сравнение КЭД и КХД. Конфайнмент и асимптотическая свобода.

Тема 7. Электрослабое взаимодействие. Теория Вайнберга – Глэшоу – Салама

1. Построение фейнмановских диаграмм взаимопревращений протона и нейтрона.

2. Диаграммы рассеяния лептонов и распадов мезонов.

3. Промежуточные векторные бозоны (ПВБ).

4. Проблема объединения электромагнитного и слабого взаимодействий

– локальная калибровочная инвариантность;

– спонтанное нарушение симметрии;

– скалярный бозон Хиггса.

Тема 8. Великое объединение фундаментальных взаимодействий. Стандартная модель

1. Объединение электромагнитного, сильного и слабого взаимодействий.

2. 24 калибровочных векторных бозона.

3. Возможная нестабильность протона.

4. Выравнивание констант связи.

5. Понятие о суперсимметрии.

На этом занятии каждый студент имеет возможность «предсказать» характеристики ещё не открытых 12 переносчиков объединённого взаимодействия и получить представление о суперсимметричных партнёрах.

Тема 9. Магнетизм микрочастиц (лабораторная работа за компьютером)

1. Объяснение аномальных магнитных моментов протона и нейтрона в рамках теории Юкавы.

2. Однуклонная модель Шмидта. Построение шмидтовских диаграмм.

3. Магнитные моменты протона и нейтрона на основе модели кварков.

4. Магнитные моменты декуплета барионных резонансов.

Заключительная контрольная работа по ФЭЧ включает следующие задания:

1. Определение электрического заряда кварков.

2. Определение изотопического спина, странности, гиперзаряда и кваркового состава адронов.

3. Построение диаграмм Фейнмана для взаимопревращений частиц и определение типа ПВБ – переносчика слабого процесса.

4. Определение типа переносчика взаимодействия согласно Стандартной модели.

Как правило, студенты успешно справляются с выполнением этих заданий. В процессе работы над курсом, помимо активной аудиторной работы, студенты выполняют домашние задания, содержащие 80 задач, а также готовят «Маленькую энциклопедию» по ФЯЭЧ по следующим разделам:

1. Словарь терминов (50 определений).

2. Основные формулы.

3. Экспериментальная база ФЯЭЧ.

4. Ведущие мировые научные центры по ядерной физике и ФЭЧ (краткая справка).

5. Вклад лауреатов Нобелевской премии в развитие ФЯЭЧ.

Опыт показывает, что даже в рамках программы педагогического вуза в условиях сравнительно небольшого числа часов можно совершить восхождение к вершинам современной физики элементарных частиц. При этом подъём на очередную ступеньку курса, помимо работы с традиционными учебными пособиями [4-6], предполагает интенсивную вычислительную деятельность самих студентов. А наградой за этот труд является достижение понимания выдающихся успехов ФЭЧ и одновременно стоящих перед ней проблем.

Аналогичный «ступенчатый» путь осуществляется и в процессе изучения других дисциплин курса «Основы теоретической физики» (см., напр., [1,2,7,8]).

Библиографический список

1. Горяинова С.М., Свирская Л.М. Электродинамика. Курс лекций в 2 ч. Часть I. Челябинск: ЮУрГГПУ. 2019. 207 с.

2. Горяинова С.М., Свирская Л.М. Электродинамика. Курс лекций в 2 ч. Часть II. Челябинск: ЮУрГГПУ. 2020. 213 с.

3. Данин Д.С. Неизбежность странного мира М.: Молодая гвардия, 1962. 368 с.

4. Капитонов И.М. Введение в физику ядра и частиц [Электронный ресурс]: учебное пособие. Электрон. текстовые данные. М.: Физматлит. 2010. 512 с.

5. Наумов А.И. Физика атомного ядра и элементарных частиц. М.: Просвещение. 1984. 384 с.

6. Рудницкая Т.Г., Изюмов Ю.А. Элементарные частицы и фундаментальные взаимодействия. Екатеринбург: УРО РАН. 2010. 348 с.

7. Свирская Л.М. Квантовая механика. Курс лекций в 2-х частях. Часть I. Издательство ЮУрГГПУ. 2018. 270 с.

8. Свирская Л.М. Квантовая механика. Курс лекций в 2-х частях. Часть II. Издательство ЮУрГГПУ. 2018. 184 с.

Сведения об авторах

Свирская Людмила Моисеевна, кандидат физико-математических наук, доцент Южно-Уральского государственного гуманитарно-педагогического университета (Россия, г. Челябинск). E-mail: svirskayalm@mail.ru.

УДК 371.39

Тлегенова Л.В.

РАЗРАБОТКА УРОКА ИНФОРМАТИКИ ДЛЯ 9-ГО КЛАССА «ПЕРЕСТАНОВКА ЭЛЕМЕНТОВ МАССИВА»

Аннотация: урок разработан с применением методики предметно-языкового интегрированного обучения CLIL, в рамках обновленного содержания образования Республики Казахстан.

Ключевые слова: урок информатики, CLIL, массивы, перестановка элементов.

Tlegenova Larissa Vladimirovna

INFORMATICS LESSON PLAN FOR 9TH GRADE "SWAP ELEMENTS IN LIST"

Annotation: this informatics lesson plan using the method of the methodology of subject-language integrated learning CLIL, within the

framework of the updated content of education in the Republic of Kazakhstan.

Keywords: informatics lesson, CLIL, lists, swap elements

Lesson topic: Swap elements in list № 2		School: КГУ «Средняя школа-гимназия № 9»
Learning Objectives		9.3.3.1 creating programs in the Python programming language (Python) using lists
Lesson objectives	for all students: create a list of a given elements; print list before and after swapping	
	for most students: swap each adjacent element	
	some students: swap list items using the method reverse	
Language objectives	Students can: - populate the list with string data programmatically - display list items programmatically - programmatically exchange list items with predefined values Vocabulary and terminology: permutations, lexicographic sort A set of phrases useful for dialogue / writing ✓ which list items are not in the right place? ✓ swap places ✓ the value of the element.... ✓ try to change... ✓ print a List ✓ Yoda changes... ✓ arrange the... ✓ import permutations...	
Instilling values	Self-education skills, the ability to work effectively both in a team and individually. The development in students of the qualities of a benevolent and sociable personality, able to think creatively and critically, through group, collective and individual activities.	
Basic knowledge, skills	Students define terms: list, index, element, value, store, swap, equal, variable, comma	
During the lesson		
Lesson stages	Planned activities	

start 10m	Organizational moment <i>Greeting, verification of those present.</i> Concentration of student attention. Warm up “<i>Make the longest word</i>” T: -Do you know that is it, Pneumonoultramicroscopicsilicovolcanoconiosis? And what does it mean? -This is one of the longest words in the English language, which consists of 45 letters and takes the fourth place in the world and was published in the words of the Oxford English Dictionary, which defines it as “an artificial long word that is said to mean lung disease. T: -In order to remember this word, let’s pronounce a word while watching a video... -Now make as many terms from the last lesson as possible from this word. Checking homework. Task execution statistics in personal pages in Learningapps.org. Ask one of students to demonstrate the most difficult task at the blackboard.
mid-lesson 11-35m	 Actualization. T: Do you know who it is? What are the oddities of Yoda? <i>Yoda is the wisest, and perhaps the most powerful Jedi of his time. Yoda is a mysterious figure and he has many oddities. One of them is that Yoda often changes the order of words in the sentence.</i>
t=7min	(P) Task 1 T: Yoda changed the word order ... Which term is hidden? Change the order of the letters so that the term of the last lesson is obtained (write the program code) 1. ddo; 2. neve; 3. wasp; 4. acmom 5. abvaleri; 6. luvea; 7. quale 8. tisl Output yoda_words

t=10min		
	Assessment criteria	Descriptors
	describe the list in a program	- create a new list; - fill the list with the letters of the yoda_word; - print a list.
	write program code to process a list	- change the code to swap all the letters they need; - print a list with normal_words.
	(I) Task 2 T: Yoda changed the arrangement of colors in the rainbow.. What colors are not in the right place? Arrange the colors correctly (write the program code) <u>Rainbow = ['Red', 'Green', 'Yellow', 'Orange', 'Blue', 'Indigo', 'Violet']</u>	
	 Output yoda_rainbow =	
	Assessment criteria	Descriptors
	describes the list in a program	- create a new list; - fill the list with the colors of the yoda_rainbow; - prints the list.
	writes program code to process a list	- change the code to swap all the colors they need; - print the list with normal_rainbow; -(differentiation) change the code to turn over the list using the least permutations;
	T: - Let's check each other and help those who couldn't	

t=7min	do this task. CHECK Rainbow = ['Red', 'Green', 'Yellow','Orange', 'Blue', 'Indigo', 'Violet'] x,y=1,3 print ('yoda_rainbow:', Rainbow) Rainbow[x],Rainbow[y]=Rainbow[y],Rainbow[x] print ('normal_rainbow:', Rainbow) *(C) A problem situation. Additional task. T:In the process of working with lists, situations often arise when it is necessary to find all possible permutations of the list. For this you can use the method permutations itertools.permutations(iterable,r=None) - permutations of length r of iterable permutations returns consecutive permutations of elements from a value of one or another length iterated by you and creates output in lexicographic sort order. The explanation of method T: Enter the program code and see what will be displayed. - Explain in your own words how the method works. What pattern is visible when displaying the result of permutations?
end of the lesson 36-40m	From itertools import permutations # Получить все перестановкииз [1, 2, 3] perm = permutations([1, 2, 3]) # Распечатать полученные перестановки for i in list (perm): print (i) # Программа Python для печати всех перестановок заданной длины From itertools import permutations # Получить все перестановки длины 2 № и длина 2 perm = permutations([1, 2, 3], 2) # Распечатать полученные перестановки for i in list(perm): print (i)

	Homework - paragraph 20 to read, learningapps.org Reflection 'Association' T: Create an association for each letter of word «YODA» on the topic of the lesson

Библиографический список

1. Yerzhan Shaniyev, Ismail Gesen, Nurbol Aidarbayev, Nursultan Akhmetov, Eldar Yerzhanov Informatics, Grade 8: билингвальный учебник - А.: Астана-кітап, 2017.
2. Ержанов Э., Гесен И., Айдарбаев Н., Ахметов Н., Шаниев Е. Informatics, Grade 9: билингвальный учебник. – А.: Astanakitap, 2019.
3. Интегрированное обучение английскому языку и учебным предметам ЕМЦ (информатика, физика, химия, биология, естествознание). Учебно-методическое пособие. – Астана: НАО имени И. Алтынсарина, 2016. – 111 с.
4. Ирсаилов С.А., Карабасова Л.Ч., Мухаметжанова А.З. и др. Организация обучения на трех языках: международный опыт и рекомендации для Казахстана. – АО «Информационно-аналитический центр», Астана, 2017.
5. Нуракаева Л.Т., Шегенова З.К. Методические рекомендации учителям по использованию метода предметно-интегрированного обучения (CLIL). – Астана. – 2013.
6. Салгараева Г.И., Калымова К.А., Орынтаева Ж.А. Информатика 9 класс: учебник. – А.: Арман-ПВ, 2019.

Сведения об авторах

Тлегенова Лариса Владимировна, педагог-исследователь, учитель информатики КГУ «Средняя школа-гимназия № 9», г. Актобе, Казахстан. E-mail: larissatleg@mail.ru.

УДК 796.011.1

Хужин Р.А.

ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ ПО ФИЗИЧЕСКОЙ КУЛЬТУРЕ В ПЕРИОД САМОИЗОЛЯЦИИ В ВУЗАХ

В статье рассматриваются проблемы и перспективы дистанционного обучения дисциплины «Физическая культура» и пути их ре-

шения, роль физической культуры и спорта в период пандемии коронавируса.

Ключевые слова: физическая культура, физическое воспитание, студент, дистанционное обучение, пандемия, физические качества.

Khuzhin R.A.

PROBLEMS AND PROSPECTS OF DISTANCE LEARNING IN PHYSICAL EDUCATION DURING THE PERIOD OF SELF-INSULATION IN UNIVERSITIES

The article discusses the problems and prospects of distance learning of the discipline «Physical culture» and the ways of their solution, the role of physical culture and sports during the coronavirus pandemic.

Keywords: physical culture, physical education, student, distance learning, pandemic, physical qualities.

Целью физического воспитания студентов является формирование физической культуры личности, наличие которой обеспечивает готовность к социально-профессиональной деятельности, включение в здоровый образ жизни, систематическое физическое самосовершенствование. Физическое воспитание в высших учебных заведениях должно содействовать в подготовке высококвалифицированных специалистов. Современные тенденции общества требуют от молодого поколения отличной физической подготовки, хорошего образования и активной жизненной позиции.

Период пандемии внёс изменения во многие сферы жизни общества и продолжает оказывать свое влияние и на образование. Из-за пандемии COVID-19, проведение учебных занятий в аудиториях и спортивных залах превратилось в большую проблему, отчего возникла потребность в социальном дистанцировании и принудительном карантине. По этой причине дистанционное обучение становится как никогда актуальным и вводится во всех образовательных учреждениях.

В связи с Указом Президента РФ от 02.04.2020 № 239 «О мерах по обеспечению санитарно-эпидемиологического благополучия населения на территории РФ в связи с распространением новой коронавирусной инфекции (COVID-19)» вузы перешли на новый формат обучения, ориентированный на применение дистанционных образовательных технологий (ДОТ) [1]. ДОТ – это форма получения образования при которой в образовательном процессе используются лучшие методы, основанные на компьютерных и телекоммуникационных

технологиях. И в связи с экстренным переходом на онлайн-формат обучения, многие преподаватели столкнулись с проблемами организации и проведения практических занятий. В большей степени это коснулось дисциплины «Физическая культура».

Учебная программа по физическому воспитанию состоит из теоретического и практического разделов. Онлайн уроки дают возможность организовать прохождение теоретического материала в доступной и наглядной форме. Проблема в основном, как дистанционно организовать и провести практические занятия.

В физическом воспитании различают два направления – это развитие физических качеств и обучение движениям. И, как дистанционно, в домашних условиях развивать основные физические качества: быстроту, выносливость, силу, ловкость и гибкость. Ещё больше проблем возникает в технической и тактической подготовке в игровых видах спорта. И каждый преподаватель по физическому воспитанию старается решить эту проблему самостоятельно. Общих положений и рекомендации пока нет.

Онлайн-формат требует сильной дисциплины и целеустремленности, чтобы самостоятельно выполнять задания и успешно их решать. У дистанционного образования есть определенные образовательные перспективы. Система дистанционного обучения даёт равные возможности всем слоям населения. Особенно это важно для людей с ограниченными физическими возможностями. Одним из его основных преимуществ является то, что оно доступно каждому, легче совместить учебу и работу и что немаловажно, стоимость при этом становится дешевле очного обучения. В целом, онлайн обучение удобно, полезно и рентабельно для многих слоёв населения.

В связи с этими положительными моментами нельзя не отметить и отрицательные стороны дистанционного обучения. Прежде всего, это ухудшение качества образования. Согласно социологическому опросу, который был проведён в августе 2020 года Институтом социального анализа и прогнозирования Российской академии народного хозяйства и госслужбы при Президенте РФ среди 30 тысяч преподавателей, работающих в вузах страны, именно снижение качества образования упоминают наиболее часто при выделении потенциальных угроз дистанционного обучения [2].

Основной недостаток дистанционного обучения – это отсутствие «живого» контакта «преподаватель – студент», что снижает восприятие информации и степень понимания материала. Трудность возни-

кает и при оценивании выполнения физических упражнений, приёме контрольных нормативов по физической подготовке, нет возможности контролировать соблюдение техники безопасности во время выполнения физических упражнений, случаются и технические сбои с интернетом и оборудованием. Дистанционное обучение в основном связано с сидячим образом жизни, что ограничивает двигательные и функциональные особенности дисциплины «Физическая культура», что отрицательно сказывается на здоровье в целом.

Ограничения на перемещение, режим самоизоляции и страх заражения сильно изменили привычный образ жизни многих людей. Как показывают исследования, уровень физической активности населения сильно снизился во время пандемии COVID-19 [3]. Поэтому, в условиях самоизоляции очень важно поддерживать свою физическую форму. При дистанционном обучении студентов, основное время отводится к самостоятельным занятиям.

Однако, дистанционное образование в области физической культуры, не может полностью заменить аудиторных занятий, а отсутствие навыков здорового образа жизни, непонимание влияния физических упражнений на организм, отрицательно отражаются на здоровье каждого студента. Поэтому, учебная дисциплина «Физическая культура», при дистанционном обучении не может быть реализована в полном объеме, возникает необходимость дополнительных исследований и разработок по улучшению преподавания данной дисциплины.

Библиографический список

1. Коваль Л.Н., Журавлёв Ю.И., Катренко М.В., Ярошенко Е.В. Физическая активность на фоне пандемии//Синтез науки и современности в решении глобальных проблем современности. – Уфа, 2020 – С.159-163.
2. Смогоржевский Д.А. Основные проблемы дистанционного обучения// Научно-образовательный журнал для студентов и преподавателей «StudNet» № 12. – Санкт-Петербург, 2020 – С. 351.
3. Указ Президента РФ от 02.04.2020 № 239 «О мерах по обеспечению санитарно-эпидемиологического благополучия населения на территории РФ в связи с распространением новой коронавирусной инфекции (COVID-19)».

Сведения об авторах

Хужин Рашит Аетбаевич, кандидат педагогических наук, доцент Башкирского кооперативного института, Уфа, E-mail: rashit805@gmail.com.

Научное издание

**АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ НАУКИ И ОБРАЗОВАНИЯ
В СОВРЕМЕННОМ ВУЗЕ**

Сборник трудов
V Международной научно-практической конференции
Республика Башкортостан, г. Стерлитамак
16–18 сентября 2021 г.

Ответственный редактор – доктор технических наук, профессор
Анвар Лутфрахманович Галиев (Стерлитамакский филиал БашГУ)

Начальник управления по ВР и СО *О.А. Шарипова*

Заведующий РИС *А.В. Кирилов*

Компьютерный набор, вёрстка *А.В. Орлов, Л.В. Леонтьева*

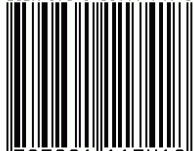
*Материалы печатаются в авторской редакции.
Авторы, редакционная коллегия несут ответственность за достоверность
материалов, изложенных в сборнике*

Подписано в набор 01.09.2021 г. Подписано в свет 13.09.2021 г.

Гарнитура «Times». Уч.-изд.л. 30,7. Усл.печ.л. 30,8.

Формат 60х84_{1/16}. Тираж 300 (1-й завод – 5) экз. Заказ № 365/21.

ISBN 978-5-86111-741-8



9 785861 117418

Редакционно-издательский сектор
Стерлитамакского филиала БашГУ:
453103, Стерлитамак, пр. Ленина, 49.