



ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ БЕЗОПАСНОГО РАЗВИТИЯ
АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК



Основные направления исследований в области безопасности атомной энергетики

РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТ ЗА 1988—2018 гг.



Большов Леонид Александрович

академик РАН,
научный руководитель ИБРАЭ РАН

Тридцать лет назад был создан Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук. Образование института непосредственно связано с уроками аварии на Чернобыльской АЭС 26 апреля 1986 года. Высшее руководство страны осознало необходимость независимой научно-технической и экспертной поддержки атомной отрасли, органов государственного управления и регулирования в вопросах, относящихся к безопасности атомной энергетики. В Советском Союзе такого рода задачи обычно поручались Академии наук. Именно поэтому на уровне Политбюро ЦК КПСС и Совета министров СССР было принято решение о создании в Академии наук нового института, призванного заниматься фундаментальными проблемами обеспечения безопасности использования атомной энергии.

С тех пор атомная энергетика в нашей стране и за рубежом переживала периоды стагнации и взлета, однако вопросы безопасности в сфере использования атомной энергии, всегда рассматривались как наиболее приоритетные. Для успешного решения этих вопросов необходимо опираться на передовые научные достижения в различных областях физики, математики, радиобиологии, инженерных и социальных наук. С этой целью в Институте удалось собрать высококвалифицированный междисциплинарный коллектив ученых, нацеленных на решение фундаментальных проблем ядерной и радиационной безопасности с последующим доведением полученных научных результатов до непосредственного практического приложения и использования в атомной и других отраслях промышленности.

Институтом разработаны уникальные физические модели, современные математические алгоритмы и на их основе созданы компьютерные коды для анализа безопасности атомных станций, объектов ядерного топливного цикла, развиты методы анализа и стратегического планирования для решения задач обращения с радиоактивными отходами, заложены научные основы и созданы системы радиационного мониторинга и аварийного реагирования, получившие практическое применение в атомной отрасли и МЧС России.

Создан постоянно действующий Центр научно-технической поддержки (ЦНТП) ИБРАЭ РАН, который включен в «Перечень сил и средств постоянной готовности федерального уровня единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций». ЦНТП ИБРАЭ РАН оказывает экспертную поддержку Национальному центру управления обороной страны, Национальному центру управления в кризисных ситуациях МЧС РФ, Ситуационному кризисному центру Госкорпорации «Росатом», Кризисному центру концерна «Росэнергоатом» и региональным кризисным центрам при реагировании на радиационные инциденты и аварии.

Среди работ Института в последние годы хотелось бы особенно отметить наше участие в реализации Государственной программы «Развитие атомного энергопромышленного комплекса», предусматривающей переход на новую технологическую платформу ядерной энергетики в целях обеспечения устойчивого развития России. Этот переход осуществляется в рамках выполнения Федеральной целевой программы «Ядерные энерготехнологии нового поколения на период 2010–2015 годов и на перспективу до 2020 года», ориентированной на развитие перспективных проектов атомных энергетических установок на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем и замкнутым топливным циклом (проектное направление «Прорыв»). Другим столь же актуальным и значимым направлением деятельности являются работы, проводимые Институт в рамках Федеральной целевой программы «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016–2020 годы и на период до 2030 года» (ФЦП ЯРБ-2), связанные с решением вопросов обращения с РАО, вывода из эксплуатации и проведения масштабных научных исследований и научно-организационных мероприятий с целью решения проблемы окончательного захоронения радиоактивных отходов.

За минувшие тридцать лет Институт стал ведущим российским научным центром в области безопасности атомной энергетики и заслужил признание и авторитет у мирового сообщества. Институт активно участвует в международном сотрудничестве. Особое внимание коллектив Института уделяет воспитанию высококвалифицированных молодых ученых. На базе ИБРАЭ РАН многие годы работает кафедра МФТИ, активно действуют Диссертационный совет и Совет молодых ученых.

В настоящей книге мы постарались кратко отразить весь спектр разнообразных исследований, проводимых в Институте, представить их результаты и рассказать о планах на будущее. Насколько нам это удалось — судить читателю.

СОДЕРЖАНИЕ



Общие сведения об ИБРАЭ РАН.....	6
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ	10
Исследования процессов тепло- и массопереноса в задачах анализа безопасности в объектах использования атомной энергии	12
<i>Свободная конвекция и теплоотдача жидкостей с внутренними источниками тепла</i>	<i>12</i>
<i>Теоретические и численные исследования захоронения РАО методом самопогружения</i>	<i>13</i>
<i>Неклассические процессы переноса в геологических средах</i>	<i>15</i>
Разработка новых методов решения уравнений и обработки данных	19
<i>Аддитивные операторно-разностные схемы (схемы расщепления)</i>	<i>19</i>
<i>Разностная схема КАБАРЕ</i>	<i>19</i>
<i>Стохастические математические модели распространения радионуклидов в сильно неоднородной трещиноватой среде</i>	<i>20</i>
<i>Явно-неявные схемы для нестационарных задач</i>	<i>22</i>
<i>Методы искусственного интеллекта для анализа данных</i>	<i>24</i>
Фундаментальные исследования в смежных областях физики	25
<i>Физика заряженных атомных кластеров. Сверхтяжелые наноатомы</i>	<i>25</i>
<i>Квантовая и классическая динамика частиц во внешних физических полях</i>	<i>26</i>
<i>Развитие подходов к созданию квантовой теории гравитации</i>	<i>28</i>
РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ, ИНСТРУМЕНТАРИЯ И ПРОВЕДЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ БЕЗОПАСНОСТИ АЭС	30
Анализ безопасности АЭС с РУ ВВЭР при запроектных и тяжелых авариях с плавлением топлива и выходом ПД за пределы барьеров безопасности	32
<i>Тяжелоаварийный расчетный код СОКРАТ</i>	<i>33</i>
Радиологические расчеты в обоснование безопасности АЭС с ВВЭР	38
Программно-технический комплекс «Виртуально-цифровая АЭС с ВВЭР»	40
<i>Состав системы расчетных кодов ПТК «Виртуально-цифровая АЭС с ВВЭР»</i>	<i>41</i>
<i>Особенности программной реализации компонентов ПТК «Виртуально-цифровая АЭС с ВВЭР»</i>	<i>42</i>
<i>Отдельные компоненты ПТК «Виртуально-цифровая АЭС с ВВЭР»</i>	<i>43</i>
<i>Текущее состояние разработки и планы дальнейшего развития Программно-технического комплекса «Виртуально-цифровая АЭС с ВВЭР»</i>	<i>49</i>
Проблемно-ориентированные расчетные коды	50
<i>Развитие и применение кодов по анализу безопасности АЭС</i>	<i>50</i>
<i>Расчетный код CONT для анализа безопасности защитных оболочек АЭС</i>	<i>51</i>
<i>Пакет программ CONV</i>	<i>55</i>
<i>Топливный код нового поколения SFPR</i>	<i>56</i>



Исследовательские проекты	57
Проект RASPLAV-MASKA.....	57
Проект PARAMETER	59
Проект FUMAC	60
Проект ERCOSAM/SAMARA.....	61
Исследования в области разработки программного обеспечения для обоснования безопасности АЭС с реакторными установками с жидкометаллическим теплоносителем.	
Проект «Коды нового поколения» проектного направления «Прорыв».....	64
Системный теплогидравлический код HYDRA-IBRAE/LM для реакторов на быстрых нейтронах	68
DNS код CONV-3D.....	70
Нейтронно-физический код CORNER	71
Твэльный код БЕРКУТ.....	72
Универсальный интегральный расчетный код Евклид.....	74
Расчетный код СОКРАТ-БН для реакторов на быстрых нейтронах.....	76
Программный комплекс GeRa для обоснования безопасности пунктов захоронения РАО.....	77
Расчетный код Сибилла для расчета облучения по водным путям.....	78
Программное средство РОМ для оценки радиационной обстановки при атмосферном переносе.....	80
Трехмерный код РОУЗ для оценки радиационной обстановки на промплощадке	81
Нейтронно-физический код ODETTA.....	82
Экспериментальные исследования.....	83
 РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И АНАЛИЗ БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТОВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ НА ЗАВЕРШАЮЩИХ СТАДИЯХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА.....	86
Информационно-аналитическая поддержка комплексного решения проблем ядерной и радиационной безопасности.....	88
Направления исследований и стратегии развития	88
Информационное обеспечение программ в сфере ЯРБ.....	93
Анализ долгосрочных рисков в сфере обеспечения ядерной и радиационной безопасности.....	98
Стратегическое планирование и проектное управление в области радиационной безопасности	110
Участие ИБРАЭ РАН в решении проблем экологической реабилитации арктического региона	110
Стратегическое планирование безопасного вывода из эксплуатации объектов атомного флота.....	112
Разработка подходов к решению проблемы реабилитации Арктических и Дальневосточных морей от радиационно опасных объектов атомного флота	118
Разработка стратегического плана и организация реализации работ по повышению радиационной безопасности объектов РАН.....	124
Стратегическое планирование комплексного решения проблем Теченского каскада водоемов.....	125
Стратегический мастер-план исследований в обоснование безопасности сооружения, эксплуатации и закрытия пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов	127
Научная поддержка совершенствования законодательства и нормативно-правового регулирования в области безопасности атомной энергетики.....	129
Исследование возможности использования атомных станций малой мощности для отдаленных и энергоизолированных потребителей.....	131



ЛИКВИДАЦИЯ ПОСЛЕДСТВИЙ РАДИАЦИОННЫХ АВАРИЙ. СОЗДАНИЕ НАУЧНЫХ ОСНОВ И РАЗРАБОТКА СИСТЕМ РАДИАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА И АВАРИЙНОГО РЕАГИРОВАНИЯ 134

Основные направления деятельности ИБРАЭ РАН в области аварийного реагирования
и радиационного мониторинга 136

Системы радиационного мониторинга: базовые сведения 137

Объектовые АСКРО, разработанные ИБРАЭ РАН 138

Территориальные АСКРО 140

Перспективные средства АСКРО 147

Научно-техническое обеспечение аварийного реагирования 151

Программно-технический комплекс поддержки принятия решений 153

Центр научно-технической поддержки ИБРАЭ РАН 161

Опыт практической работы ЦНТП ИБРАЭ РАН 163

Учения и тренировки 169

Научные основы реагирования на акты радиологического терроризма 171

Угрозы радиационного характера в зонах военных конфликтов 173



СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПОСЛЕДСТВИЙ АВАРИЙ НА АЭС 174

Системно-аналитическое сопровождение и информационная поддержка программ ликвидации
последствий аварии на ЧАЭС 176

Анализ социально-экономических последствий аварии на АЭС «Фукусима-1» 182

Информирование общественности 184



ЦИФРОВИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ, ПРОДУКЦИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ И ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ 186

Технологии цифровизации и управления жизненным циклом 189

Направления исследований и проекты 194



НАУЧНО-ОРГАНИЗАЦИОННЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ 208

Технологическая платформа «Комплексная безопасность промышленности и энергетики» 210

Научно-образовательная деятельность 216

Кафедра проблем безопасного развития современных энергетических технологий 216

Совет молодых ученых 219

Аспирантура 222

Диссертационный Совет 222

Научно-издательская деятельность 224

Публикации ИБРАЭ РАН 224

Научные журналы 226



МЕЖДУНАРОДНОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО 230

Принятые сокращения 238

Термины и обозначения 240

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ИБРАЭ РАН



Федеральное государственное учреждение науки Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук создан Распоряжением Совета Министров СССР от 3 ноября 1988 г. № 2198р в целях расширения и углубления фундаментальных исследований, создающих основу для обеспечения безопасности атомной энергетики.

- Основная методология Института — комплексный анализ безопасности объектов атомной энергетики, включая ядерный топливный цикл, с использованием современных компьютерных технологий. В Институте разрабатываются эффективные подходы к обоснованию безопасности, которые базируются на разработке и практическом применении современных математических и программных алгоритмов, разработке детальных физических моделей сложных процессов и методов вероятностного анализа безопасности, организации банков экспериментальных и эксплуатационных данных, создании численных моделей переноса радиоактивных и химически опасных веществ в окружающей среде и эффективных методик оценки влияния этих веществ на природную среду и человека.
- ИБРАЭ РАН является единственным институтом Российской академии наук, специализирующимся в области комплексных исследований проблем безопасности объектов атомной энергетики и промышленности.

- В Институте сформирован высококвалифицированный творческий коллектив, уникальной особенностью которого является оптимальное сочетание специалистов в области теоретической и экспериментальной физики, ядерной энергетики, биофизики, радиоэкологии, вычислительной математики и информатики.
- ИБРАЭ РАН осуществляет широкое научное сотрудничество с ведущими российскими, зарубежными и международными организациями, в числе которых Ростехнадзор, Госкорпорация «Росатом», АО «Атомэнергпром», АО «ТВЭЛ», АО «Концерн Росэнергоатом», МЧС России, НЦУО и ВМФ МО РФ, Комиссариат по альтернативной и атомной энергии и Институт радиационной защиты и ядерной безопасности Франции, Ядерный исследовательский центр в Карлсруэ (Германия), Международное агентство по атомной энергии, Агентство по атомной энергии Организации экономического сотрудничества и развития, и многие другие организации. Фундаментальные и прикладные исследования в ИБРАЭ РАН ведутся в тесном сотрудничестве с НТЦ ЯРБ Ростехнадзора, НИЦ «Курчатовский Институт», ОИВТ РАН, ИНЭИ РАН, ИТ СО РАН, ИВМ РАН, ИПМ РАН, ИГЕМ РАН, ОКБМ (Н. Новгород), ОКБ «Гидропресс», НПО «Маяк», РФЯЦ ВНИИЭФ, РФЯЦ ВНИИТФ, АО «АТОМПРОЕКТ», АО «Атомэнергпроект», АО «ВНИИАЭС», АО «НИКИЭТ», АО «ГНЦ ФЭИ», ФГУП «ФЦ ЯРБ»; ФГУП «Звездочка», СевРАО, ДальРАО и др.

тов. Большову Л. А.

Не для печати



Совет Министров СССР

РАСПОРЯЖЕНИЕ

от 3 ноября 1988 г. № 2198р

МОСКВА, КРЕМЛЬ

1. В целях усиления фундаментальных исследований по решению важнейших научных проблем безопасности развития атомной энергетики и разработки научных основ создания экономичных, надежных и безопасных ядерных реакторов и атомных станций принять предложение Академии наук СССР и ГКНТ СССР, согласованное с Госпланом СССР, Госкомтрудом СССР и Министром науки, о создании в г. Москве Института проблем безопасного развития атомной энергетики Академии наук СССР.

Создание указанного института осуществлять в пределах финансовых и материальных ресурсов, планов по труду, бюджетных ассигнований и других лимитов и нормативов, установленных Академией наук СССР на научно-исследовательские работы по г. Москве.

2. Считать главным заданием Института решение проблем безопасного развития атомной энергетики Академии наук СССР:

разработку совместно с научно-исследовательскими организациями заинтересованных министерств и ведомств научно обоснованной концепции безопасного развития атомной энергетики, научных основ создания экономичных, надежных и безопасных ядерных реакторов и атомных станций, а также принципов размещения указанных станций;

комплексное исследование последствий атомной энергетики на окружающую среду;

разработку математических методов вероятностного анализа безопасности и оценки риска в атомной энергетике;

разработку научных основ создания высокоэффективных методов локализации радиационно-энергетических аварий на объектах атомной энергетики, а также ликвидации последствий этих аварий;

разработку научных основ отбора, подготовки и повышения квалификации персонала для атомной энергетики.

3. Поручить Госкомтруд СССР совместно с ЦУСЦИС и из согласованных с Минфин СССР установить условия оплаты труда для работников Института проблем безопасного развития атомной энергетики Академии наук СССР в соответствии с условиями оплаты труда, установленными для соответствующих работников Института атомной энергии имени И. В. Курчатова Министром науки СССР.

Создать, за исключением и указанного институт работников предприятий, учреждений и организаций системы Министром науки СССР и Министром труда СССР льготы и привилегии, которые они имели по своему месту работы.

4. Поручить Академии наук СССР:

привлечь в 1989—1990 годах для работы в Институте проблем безопасного развития атомной энергетики институтский учет в высококвалифицированных специалистах в количестве до 15 человек ежегодно;

осуществить строительство в 1991—1995 годах в г. Москве для указанного института здания площадью 12 тыс. кв. метров. Министр-плану обеспечить иных жилищных условий для строительства этого здания.

5. Министром науки СССР:

оказать совместно Академии наук СССР в комплексе Института проблем безопасного развития атомной энергетики высокоэффективную материальную и финансовую поддержку и обеспечить научные исследования в экспериментальной базе этого института;

осуществить в 1989—1990 годах проектирование и в 1991—1995 годах строительство указанного в пункте 4 настоящего распоряжения здания на условиях договора издательства Академии наук СССР.

6. Госплану СССР, Госбюджету СССР и ГКНТ СССР предусматривать и планов на 1989—1990 годы выделение Академией наук СССР для обеспечения Института проблем безопасного развития атомной энергетики необходимых «оборудования, научных приборов и экспериментальной техники» (по установленному распределению номенклатуры).

7. Госбюджету СССР выделить по заявлениям Академии наук СССР (дополнительно к ее лимитам) в 1989—1990 годах целевым назначением для создания Института проблем безопасного развития атомной энергетики 5 летних автомобилей, в том числе ГАЗ-3102 «Волга» — 3 и «Москвич-2141» — 2, а также 3 автобуса ИАЗ-2203 «1» — ИАЗ-2201.

8. Академии наук СССР и 3-месячный срок разработать с участием Министром науки СССР, Министром труда СССР, Госкоминформационным СССР и утвердить заключение об Институте проблем безопасного развития атомной энергетики.

Секретарь Совета Министров СССР И. РЫЖКОВ

ОБЩЕГО
ОТДЕЛА

В ПОДЛИННОМ ВЕРНО

Зам. начальника Юридического отдела
Российской академии наук

Петренко Л.Ф.

11 ноября 1988 г.

ИСТОРИЧЕСКАЯ СПРАВКА

Переломным событием, во многом определившим дальнейшее развитие атомной отрасли, стала авария на Чернобыльской АЭС 26 апреля 1986 года. В ситуации, когда требовалось срочно обеспечить научно-техническую поддержку работ по ликвидации ее последствий, вице-президент АН СССР академик Е. П. Велихов создал независимую экспертно-аналитическую группу, в задачу которой входили физическое и численное моделирование процессов в аварийном энергоблоке, оценка и прогнозирование радиологической обстановки. Экспертная группа, ядро которой составили сотрудники Троицкого филиала Института атомной энергии им. И. В. Курчатова, — Л. А. Большов, А. М. Дыхне, Р. В. Арутюнян и др., — продемонстрировала высокую эффективность работы, сумев в короткий срок выполнить сложные расчеты и подготовить рекомендации по проведению важнейших противоаварийных мероприятий, проработав в г. Чернобыль и на площадке ЧАЭС до ноября 1986 г.

Авария на ЧАЭС со всей очевидностью доказала необходимость проведения целенаправленных фундаментальных и прикладных научных исследований по всему комплексу проблем, относящихся к обеспечению безопасности ядерных объектов, начиная с этапа проектирования и вплоть до вывода объекта из эксплуатации, от моделирования и оптимизации технологических процессов в АЭС до организации системы аварийного реагирования и радиационной защиты населения и окружающей среды. Для руководства страны значимым уроком Чернобыля стало понимание того, что объективность этих исследований во многом определяется наличием независимого от «профильных» ведомств научно-технического потенциала.

Во исполнение решения Политбюро распоряжением Совета Министров СССР от 3.11.1988 г. № 2198 р был создан академический Институт проблем безопасного развития атомной энергетики (с 1991 г. — ИБРАЭ РАН), ядром которого стали участники чернобыльской экспертной группы во главе с Л. А. Большовым. Директором-организатором института был назначен Е. П. Велихов, а первым заместителем — Л. А. Большов, который возглавил институт в 1990 году.

Сегодня ИБРАЭ РАН — один из крупнейших в России центров фундаментальных и прикладных исследований в области комплексного обеспечения безопасности объектов атомной энергетики. В нем собраны высококвалифицированные ученые и эксперты, знания и опыт которых позволяют эффективно работать на стыке различных областей науки и техники — ядерной физики и химии, прикладной механики и теплогидродинамики, информатики и радиационной медицины. Работы и проекты, выполненные сотрудниками ИБРАЭ РАН, получили широкое признание в нашей стране и за рубежом.

НАПРАВЛЕНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ИНСТИТУТА

Фундаментальные научные исследования, создающие основу для решения проблем ядерной и радиационной безопасности:

- исследования процессов тепло- и массопереноса в задачах анализа безопасности в объектах использования атомной энергии;
- развитие современных математических методов исследований, разработка высокопроизводительных вычислительных алгоритмов, методов решения уравнений и обработки данных;
- теоретические исследования в смежных областях физики.

Прикладные исследования, направленные на разработку методов, инструментария и проведение исследований безопасности АЭС:

- разработка и внедрение национального интегрированного программного комплекса «СОКРАТ» для анализа тяжелых аварий на АЭС с реакторами водо-водяного типа на тепловых нейтронах;
- применение современных цифровых технологий при моделировании основных физико-химических процессов и обосновании радиоэкологической безопасности АЭС с реакторами водо-водяного типа на тепловых нейтронах;
- разработка и внедрение инновационного программно-технического комплекса «Виртуально-цифровая АЭС с ВВЭР»;
- разработка проблемно-ориентированных программных комплексов и расчетных кодов для моделирования поведения АЭС в области нормальных и запроектных режимов; создание топливных кодов нового поколения;
- участие в российских и международных научно-исследовательских проектах, посвященных изучению физическо-химических и теплогидравлических процессов в ядерных реакторах различных типов в проектных и запроектных режимах работы, в том числе при моделировании тяжелых аварий реакторных установок;
- развитие ядерных энерготехнологий нового поколения, разработка и внедрение компьютерных кодов нового поколения для моделирования физическо-химических, нейтронно-физических, теплогидравлических процессов в ядерных реакторах на быстрых нейтронах с жидкотопливным теплоносителем и анализа ядерного топливного цикла.

Разработка методов и анализ безопасности объектов использования атомной энергии на завершающих стадиях жизненного цикла:

- информационно-аналитическая и организационно-нормативная поддержка комплексного решения проблем ядерной и радиационной безопасности; участие в разработке и реализации федеральных целевых программ в сфере ЯРБ;
- разработка эффективных методик и инструментов оценки долгосрочных рисков, средств анализа безопасности объектов наследия и обоснования решений по завершающим стадиям ядерного жизненного цикла;
- развитие методологии стратегического планирования и проектного управления в области радиационной безопасности; участие в разработке и реализации крупномасштабных программ, направленных на решение проблем экологической реабилитации Арктического региона, обеспечение долговременной безопасности объектов ядерного наследия (Теченского каскада водоемов) и пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов в Нижнеканском массиве, повышение радиационной безопасности объектов РАН.

Фундаментальные и прикладные исследования в области разработки научных основ организации систем радиационного мониторинга, аварийного реагирования и ликвидации последствий радиационных аварий:

- создание, развитие и научно-техническая поддержка объектовых и территориальных автоматизированных систем контроля радиационной обстановки на основе разработанных в ИБРАЭ моделей, программных кодов и геоинформационных систем в различных регионах Российской Федерации;
- разработка и внедрение современных программно-технических средств поддержки принятия решений в задачах аварийного реагирования;
- развитие Центра научно-технической поддержки ИБРАЭ РАН, осуществляющего решение задач по оперативной экспертной и научно-технической поддержке национальных кризисных центров в сфере аварийного реагирования на чрезвычайные ситуации с радиационным фактором;
- активное участие в подготовке и практической реализации масштабных российских и международных учений по ликвидации последствий радиационных аварий и предотвращению угроз радиологического терроризма.

Исследования социально-экономических аспектов развития атомной энергетики:

- участие в разработке и практической реализации мероприятий по системно-аналитическому сопровождению и информационной поддержке программ ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС;
- разработка и реализация информационно-просветительских мероприятий по взаимодействию с общественностью в сфере обеспечения безопасности объектов использования атомной энергии;
- исследования экономических, экологических и социальных аспектов разработки и использования атомных станций малой мощности.

Исследования в области цифровизации и управления жизненным циклом объектов атомной энергетики, продукции машиностроения и программных комплексов:

- разработка технологий управления расчетными обоснованиями безопасности объектов ядерного топливного цикла, создание информационной системы управления данными жизненного цикла проектного направления «Прорыв»;
- внедрение технологий управления и информационное сопровождение комплексных проектов и программ.

Научно-организационная деятельность, включающая в себя:

- координацию и научно-организационное сопровождение деятельности технологической платформы «Комплексная безопасность промышленности и энергетики», обеспечивающей создание инновационных технологий, услуг и продуктов в области технологической безопасности;
- научно-образовательную деятельность, связанную с обеспечением эффективной работы Диссертационного совета, Кафедры проблем безопасного развития современных энергетических технологий МФТИ, поддержку молодых ученых и Совета молодых ученых ИБРАЭ РАН;
- научно-издательскую деятельность, направленную на подготовку к публикации и издание научных трудов ИБРАЭ РАН, издание и информационную поддержку научных журналов «Арктика: экология и экономика» и «Радиоактивные отходы», учредителями которых является ИБРАЭ РАН, развитие и продвижение интернет-портала Института.

Широкомасштабное сотрудничество с международными, государственными и неправительственными организациями в сфере обеспечения безопасности атомной энергетики, радиационного мониторинга и аварийного реагирования. В качестве экспертной организации ИБРАЭ РАН участвует в реализации ряда межправительственных соглашений и международных программ.



Поздравляем с тридцатилетием Института!

Слева направо: Пономарев В. Н., д.ф.-м.н., зам. директора по стратегическому развитию и инновациям; Цацулина О. В., зам директора по экономике и финансам; Большов Л. А., академик РАН, научный руководитель; Арутюнян Р. В., д.ф.-м.н., зам. директора по научной работе и координации перспективных разработок

Фундаментальные исследования



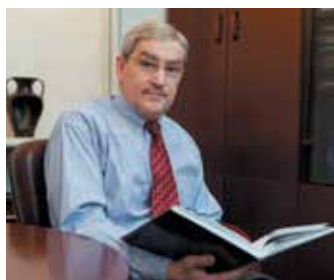
*В книге дано краткое описание результатов
ряда фундаментальных
исследований, проведенных в ИБРАЭ РАН.
Являя собой лишь «вершину айсберга»,
они тем не менее дают адекватное
представление о той огромной научной
работе по обеспечению ядерной,
радиационной и экологической безопасности
объектов атомной энергетики и
промышленности, которая была выполнена
специалистами Института за 30 лет
его существования.*



ИБРАЭ РАН проводит фундаментальные исследования в области обеспечения безопасности атомной энергетики, концентрируя основные усилия в следующих направлениях:

- исследования проблем безопасности реакторов на тепловых нейтронах с водным теплоносителем и реакторов на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем;
- теоретические исследования переноса радиоактивной примеси в геологических и сильно неупорядоченных средах;
- разработка математических моделей распространения радионуклидов и методик практического использования результатов этих исследований при захоронении радиоактивных отходов (РАО) и обосновании радиоэкологической безопасности ядерно и радиационно опасных объектов (ЯРОО);
- теоретические исследования в области квантовой и классической динамики частиц со спином при воздействии внешних полей; развитие подходов к созданию квантовой теории гравитации;
- теоретические исследования в области физики заряженных атомных кластеров;
- исследования фундаментальных проблем вычислительной математики в применении к моделированию физических процессов в атомных реакторах, разработка новых методов искусственного интеллекта.

ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОСА В ЗАДАЧАХ АНАЛИЗА БЕЗОПАСНОСТИ В ОБЪЕКТАХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ



**Большов
Леонид Александрович**

академик РАН,
научный руководитель ИБРАЭ РАН

«Визитной карточкой Института является сбалансированное сочетание фундаментальных научных исследований и актуальных прикладных разработок в сфере обеспечения безопасности атомной энергетики. Научно-технические результаты, достигнутые за 30 лет работы в этом направлении, получили мировое признание и широко используются в атомной отрасли. Не менее важная особенность работ Института состоит в комплексном характере проводимых исследований, которые охватывают широкий пласт проблем, начиная от численного моделирования физических процессов, связанных с функционированием реакторных установок, АЭС и объектов ядерного топливного цикла, и заканчивая анализом радиологических, экологических и социально-экономических аспектов функционирования объектов атомной энергетики и промышленности».

Свободная конвекция и теплоотдача жидкостей с внутренними источниками тепла

При анализе сценариев и прогнозировании последствий тяжелых аварий на АЭС, сопровождающихся расплавлением активной зоны, актуальной является задача расчета систем локализации и удержания радиоактивного расплава в корпусе реактора. Для такого расчета необходимо знать распределение теплоотдачи расплава по границе корпуса реактора, что, в свою очередь, требует проведения расчетно-теоретических исследований процессов свободной конвекции тепловыделяющей жидкости, заключенной в замкнутом объеме. К другому классу задач подобного рода, востребованных при обосновании водородной безопасности атомных реакторов и оптимизации устройства водородных рекомбинаторов, относится свободная конвекция жидкости при наличии поверхностных источников тепла.

В ИБРАЭ РАН впервые для жидкостей с внутренними источниками тепла разработан метод аналитических оценок (акад. Л. А. Большов, д.ф.-м.н. П. С. Кондратенко, д.ф.-м.н. В. Ф. Стрижов), основанный на общих принципах, описывающих свойства симметрии и законы сохранения физических величин, а также на соображениях размерности и подобия. Проведена классификация физических режимов конвекции жидкости с внутренними источниками тепла во всем представляющем практический интерес диапазоне параметров и получены полуколичественные закономерности для распределения теплоотдачи и температуры внутри основного занимаемого жидкостью объема (см. рис. на стр. 13).

Аналитически решена задача о фокусировке теплового потока при концентрационной стратификации многокомпонентного расплава с выделением компоненты без внутренних источников тепла. Для легкой компоненты получена простая интерполяционная формула, описывающая плотность потока тепла к границе.

Теоретически исследованы характеристики свободной конвекции тепловыделяющей жидкости с неоднородным распределением внутренних источников тепла при ее охлаждении с границы. Установлено, что распределение температуры в объеме жидкости и поток тепла к границе однозначно определяются распределением по вертикали усредненной по горизонтальному сечению мощности внутренних источников тепла.

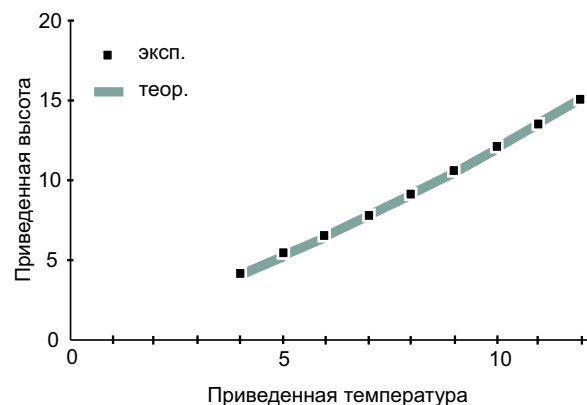


Разработана математическая модель свободной конвекции водородо-воздушной смеси в каналах с химическими превращениями на твердых поверхностях. Она описывает процесс тепло- и массообмена в пассивных каталитических рекомбинаторах водорода (ПКРВ), обеспечивающих водородную взрывозащиту на объектах энергетики и промышленности. Модель использовалась при проведении совместных с ОАО «ВТИ» работ по оптимизации конструкции и улучшению характеристик отечественного ПКРВ нового поколения (проектировщик — ЗАО ИНПК «Русские энергетические технологии»).

Теоретические и численные исследования захоронения РАО методом самопогружения

В ИБРАЭ РАН (д.ф.-м.н. Р. В. Арутюнян, А. М. Шведов, к.ф.-м.н. А. Р. Аветисян) проводятся теоретические и численные исследования способа самозахоронения РАО для изоляции долгоживущих высокоактивных РАО, включая трансурановые элементы. Этот способ рассматривается как альтернатива другим способам глубинного захоронения и потенциально позволяет осуществлять погружение на глубины в несколько десятков километров. При этом обеспечивается многослойный геологический барьер, практически исключающий возвращение радионуклидов обратно в биосферу. В качестве возможных сред для захоронения долгоживущих высокоактивных РАО могут использоваться гранитоидные или базальтовые массивы, а также другие кристаллические породы. Средняя скорость погружения такой капсулы может составлять порядка 1 км/год.

На фото: руководство Института и сотрудники лаборатории теоретической физики, слева направо: д.ф.-м.н. Арутюнян Р. В., к.ф.-м.н. Обухов Ю. Н., к.ф.-м.н. Драников И. Л., к.ф.-м.н. Васильев А. Д., д.ф.-м.н. Матвеев Л. В., д.ф.-м.н. Буринский А. Я., академик РАН Большов Л. А., к.ф.-м.н. Аветисян А. Р., д.ф.-м.н. Кондратенко П. С.



Распределение температуры в потоке жидкости по высоте, демонстрирующее закономерность $T(z) \sim z^{4/5}$, где z — высота

Для снижения температурных нагрузок на элементы устройства специалистами ИБРАЭ РАН предложен вариант схемы самозахоронения с раздельным размещением подлежащих захоронению РАО и тепловыделяющих радионуклидов, обеспечивающих необходимое для погружения энерговыделение. Предполагается, что тепловыделяющие радионуклиды размещаются внутри тепловыделяющих элементов, в то время как РАО помещаются в отдельные контейнеры, закрепленные к устройству со стороны, противоположной движению. Для передачи энергии окружающей породе могут быть использованы различные теплофизические механизмы, такие, как теплопроводность и прямой нагрев пород излучением.

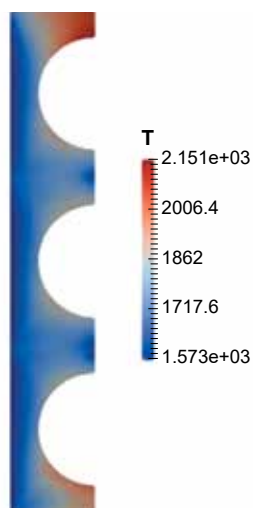
Особое внимание уделено исследованию способа самозахоронения РАО на основе прямого нагрева пород излучением. Под прямым нагревом понимается перенос излучения и его преимущественное поглощение в окружающей породе, а не внутри устройства. Таким образом, основная доля (>80%) выделяемой энергии будет поглощаться за пределами устройства, что приведет к снижению температурных нагрузок и повышению надежности способа. Минимума поглощения энергии внутри устройства погружения можно добиться, придав устройству форму, близкую к плоской, и используя в качестве источников тепла радионуклиды с высоким удельным энерговыделением, излучение которых характеризуется высокой проникающей способностью. По результатам проведенного анализа был сделан вывод о том, что наиболее подходящим для реализации прямого нагрева пород является радионуклид ^{60}Co , характеризующийся гамма-излучением с эффективной энергией 1,25 МэВ и выходом, составляющим 2 гамма-кванта на распад; удельное энерговыделение ^{60}Co также значительно выше, чем у ^{137}Cs .

В ходе проведенных исследований механизма прямого нагрева пород излучением получены:

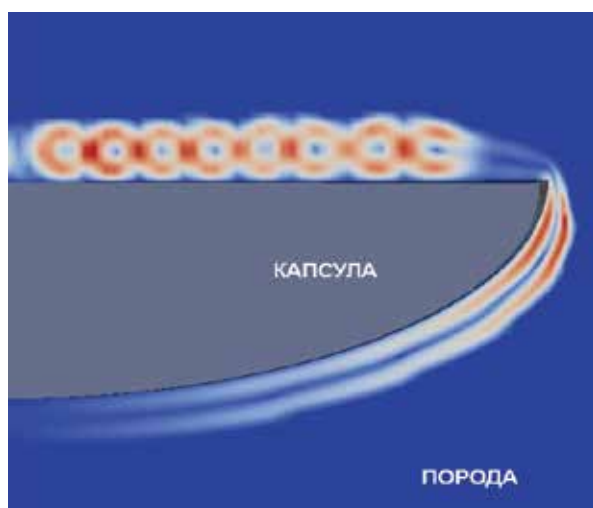
- пространственное распределение энерговыделения за счет поглощения гамма-излучения радионуклида ^{60}Co в окружающих породах (гранит, соль, лед);
- уравнение для определения скорости погружения в зависимости от средней поверхностной активности радионуклидов в устройстве и свойств окружающей породы;
- аналитические выражения для вычисления распределения температур в окружающих породах;
- оценки скорости погружения для пород гранит, соль и лед в зависимости от содержания ^{60}Co в тепловыделяющих элементах.

Разработаны методы моделирования сопряженных процессов теплообмена и гидродинамики с учетом плавления и отвердевания неоднородных геологических пород, а также процессов нагрева пород гамма-излучением при самопогружении в них (под действием силы тяжести) тепловыделяющих капсул с РАО. Проводятся теоретические и численные исследования различных схем радиоизотопных самопогружающихся устройств гетерогенных конструкций. Проходит верификацию программный комплекс MELT-GEO, реализующий математическую модель самопогружения, основанную на использовании метода сквозного счета. Этот метод позволяет определять границу расплав-порода без дополнительных итераций.

Масса долгоживущих высокоактивных РАО, которые могут быть захоронены данным способом, оценивается на уровне нескольких тонн, что соответствует массе высокоактивных трансурановых элементов в годовой выгрузке ОЯТ более 30 энергоблоков АЭС мощностью 1 ГВт.



а)



б)

а) Распределение температуры в ячейке самопогружающегося устройства гетерогенной конструкции

б) Процесс вытеснения расплава породы капсулой с РАО (расчет с использованием кода MELT-GEO)

Неклассические процессы переноса в геологических средах

Резкий контраст в распределении транспортных характеристик среды проявляет себя в том, что по отношению к примеси слабопроницаемая подсистема действует как ловушка. В результате в течение относительно продолжительных интервалов времени действуют аномальные режимы переноса замедленного типа — субдиффузия и квазидиффузия. Фрактальная структура системы трещин в геологической среде является причиной возникновения дальнодействующих корреляций в распределении скорости инфильтрации влаги в среде, что, в свою очередь, может приводить к установлению ускоренного режима переноса — супердиффузии.

Во всех исследованных физических моделях, реалистически отражающих свойства геологических сред, асимптотики концентрации на далеких расстояниях от источника примеси являются экспоненциальными. При этом по сравнению с гауссовой экспонентой, характерной для классической диффузии, асимптотика в режиме супердиффузии соответствует сжатой экспоненте, а в режиме субдиффузии — растянутой экспоненте. Эти результаты находятся в резком контрасте с выводами чисто математической модели дробной диффузии, в которой асимптотики концентрации имеют характер тяжелых степенных хвостов (см. рис. на стр. 16).

В тех случаях, когда со временем происходит смена режимов переноса (как, например, в модели регулярно неоднородной среды (модели Дыхне) — сначала быстрая классическая диффузия, затем субдиффузия и, наконец, медленная классическая диффузия), асимптотики концентрации являются многоступенчатыми. Соблюдается закономерность: чем более далекая ступень — тем более раннему режиму она соответствует; самая близкая ступень определяется текущим режимом переноса.

Присутствие заградительного барьера, окружающего источник примеси, ведет к существенному замедлению режимов переноса на относительно малых временах и приводит к возникновению дополнительных ступеней асимптотик концентрации не только на малых, но и на больших временах.

Пространственные флуктуации транспортных характеристик среды на малых расстояниях от источника примеси приводят к значительной перенормировке эффективной мощности источника. Проведенный в лаборатории теоретической физики ИБРАЭ РАН анализ показал, что результатом влияния флуктуаций является немонотонная зависимость с резко выраженным максимумом фактора риска (определенного как отношение потока примеси к предельно допустимой величине) от площади контакта захоронения со средой (см. рис. на стр. 16).

Коллоидно-усиленный перенос примеси в геологических средах

Впервые разработана теоретическая модель коллоидно-усиленного переноса примеси в сильно контрастных средах с различными типами корреляций в распределении структурных неоднородностей (регулярно-неоднородные, фрактальные и статистически однородные среды). Наличие коллоидных частиц, адсорбирующих примесь, приводит к подавлению процессов ухода примеси в застойные области, тем



**Матвеев
Леонид Владимирович**

д.ф.-м.н., вр.и.о. директора ИБРАЭ РАН

«Общепризнанным методом решения проблемы окончательной утилизации радиоактивных отходов является их захоронение в геологических формациях. В этой связи в лаборатории теоретической физики ИБРАЭ РАН были проведены исследования неклассических процессов переноса радиоактивной примеси в сильно неоднородных геологических средах, посвященные анализу физических моделей, отражающих наиболее значимые особенности этих процессов. В книге приведены основные результаты этих исследований».

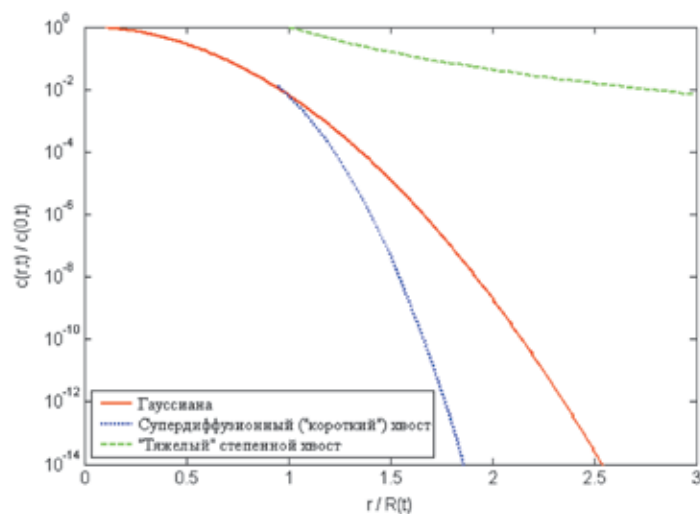
самым усиливая перенос примеси на большие расстояния. В итоге, в ряде случаев существуют большие интервалы времени, в течение которых практически вся примесь оказывается сосредоточенной на коллоидах и переносится вместе с ними. Характер переноса зависит от типа среды, так что могут реализоваться как суб-, так и супердиффузионный режимы, а также режим адвекции-диффузии. Результаты теории являются критически важными для обоснования безопасности захоронения радиоактивных отходов в геологических средах.

Автомодельные решения в нелинейных задачах фильтрации в пористых средах

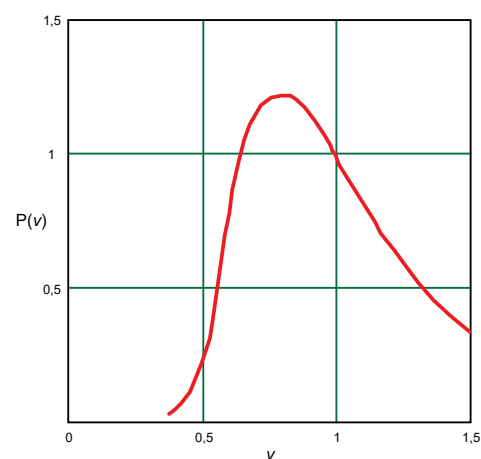
В рамках исследования проблемы переноса загрязнений в геологических средах было найдено решение ряда нелинейных задач методом построения промежуточных асимптотик. Метод подразумевает выбор управляющих параметров, диктующих поведение системы в нужном пространственно-временном интервале, и получение на их основе автомодельного решения. Решены такие задачи, как расплывание бугра грунтовых вод в пористой среде при постоянной локализованной подпитке, расплывание бугра технологических растворов в водоносном слое. В настоящее время эти работы продолжаются с целью учета возможной сильной неоднородности (двупористости) геологической среды.

Реабилитация загрязненных территорий

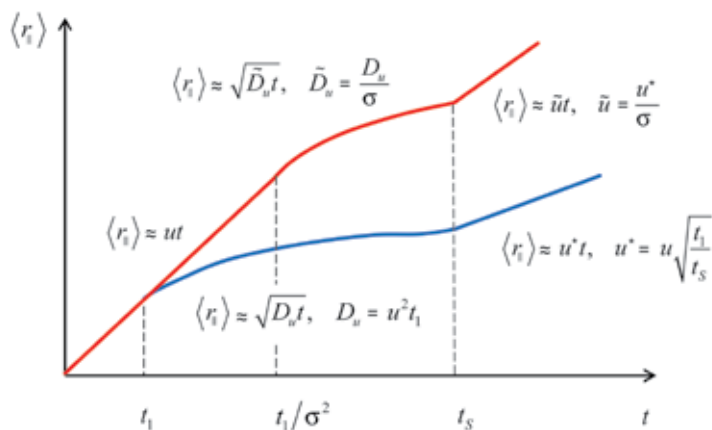
В настоящее время существуют радиационно-загрязненные территории, нуждающиеся в проведении реабилитационных мероприятий. Так, в местах размещения приповерхностных



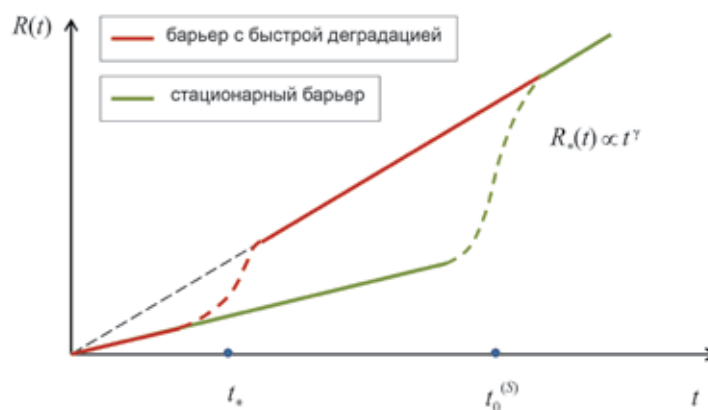
Асимптотические профили концентрации в трех моделях: классической диффузии (гауссиана), случайной адвекции при $h=0,5$ (супердиффузионный («короткий») хвост) и дробной диффузии («тяжелый» степенной хвост)



Зависимость фактора риска от площади контакта захоронения со средой



Среднее смещение частиц примеси в статистически однородной резко контрастной среде при наличии (—) и в отсутствие (—) коллоидов



Размер основной области локализации в зависимости от времени в случае быстрой деградации (схематически)

хранилищ РАО в результате нарушения изолирующих свойств контейнеров и разрушения инженерных барьеров со временем происходит проникновение радиотоксичных веществ в подстилающие геологические формации, поэтому даже при полной ликвидации приповерхностного хранилища данная область представляет собой неконтролируемый источник радиоактивных загрязнений. Для реабилитации таких территорий обычно применяются следующие основные методики:

- выборки загрязненного грунта с последующей его дезактивацией и заполнением котлованов чистым грунтом;
- создания геофизических сорбирующих барьеров на путях миграции радионуклидов;
- вымывания (выщелачивания) радионуклидов стимулированным потоком грунтовых вод.

Для оценки эффективности двух последних методов была разработана модель, описывающая динамику выщелачивания накопленных загрязнений из сильно неоднородной двупористой среды за счет фильтрации чистой жидкости через среду. В рамках этой модели показано, что процесс очистки можно значительно ускорить, если жидкость будет содержать коллоидные частицы, способные сорбировать примесь.

Перенос примеси во фрактальных средах в присутствии деградирующего диффузионного барьера

Проанализированы режимы переноса и асимптотики концентрации примеси в случайно-неоднородной фрактальной среде в случае, когда источник примеси окружен слабопроницаемым барьером, испытывающим процессы деградации. Систематика режимов переноса зависит от соотношения между временем выхода примеси из барьера (t_0) и временем начала разрушения (t_*). При $t_0 < t_*$ процессы разрушения не играют роли. В обратном случае, когда $t_0 > t_*$, на временах $t < t_*$ результаты формально сводятся к задаче со стационарным барьером. Характеристики режимов при $t_* < t < t_0$ зависят от сценария, по которому происходит разрушение барьера. При экспоненциально быстром сценарии интервал $t_* < t < t_0$ оказывается очень узким, и тогда режим переноса, идущий на временах $t < t_*$, практически скачкообразно переходит в режим задачи без барьера. При медленном степенном сценарии в продолжительном интервале времени $t_* < t < t_0$ перенос идет в новом режиме, который по сравнению с задачей со стационарным барьером является более быстрым, но медленным по отношению к задаче без барьера. Асимптотика концентрации на далеких расстояниях от источника на временах $t < t_0$ является двухступенчатой, а при $t > t_0$ — одноступенчатой. Более далекая ступень при $t < t_0$ и единственная ступень при $t > t_0$ совпадают с асимптотикой в задаче без барьера. (см. рис. на стр. 16).

Асимптотический подход к описанию неклассических процессов переноса. Принцип Ферма

Впервые разработан метод вычисления распределения концентрации на асимптотически далеких расстояниях от источника примеси в среде, обладающей крупномасштабными неоднородностями. Установлено, что показатель экспоненты $\Gamma \gg 1$ в выражении для концентрации удовлетворяет нелинейному уравнению в частных производных первого порядка. Это позволило при вычислении функции Γ воспользоваться вариационным принципом. Предэкспонента в выражении для концентрации найдена в ведущем приближении по малому параметру Γ^{-1} .



**Кондратенко
Петр Сергеевич**

д.ф.-м.н., зав. лабораторией
теоретической физики

«Замечательной особенностью физики является то, что между явлениями, относящимися к самым отдаленным друг от друга ее разделам, во многих случаях возникают близкие аналогии. Это, в свою очередь, дает возможность при построении теории в одной области физики проводить заимствования из других областей. Классический пример тому представляют методы квантовой теории поля (в частности, диаграммы Фейнмана) в статистической физике. Другим, хотя и значительно более скромным, примером является применение методов геометрической оптики (принцип Ферма) в теории переноса в сильно неоднородных средах».



Прослеживается аналогия с геометрической оптикой (принцип Ферма) и квазиклассическим приближением в квантовой механике. Предложенный подход открывает новый и одновременно простой путь решения задач о неклассических процессах переноса примеси в сильно неоднородных средах.

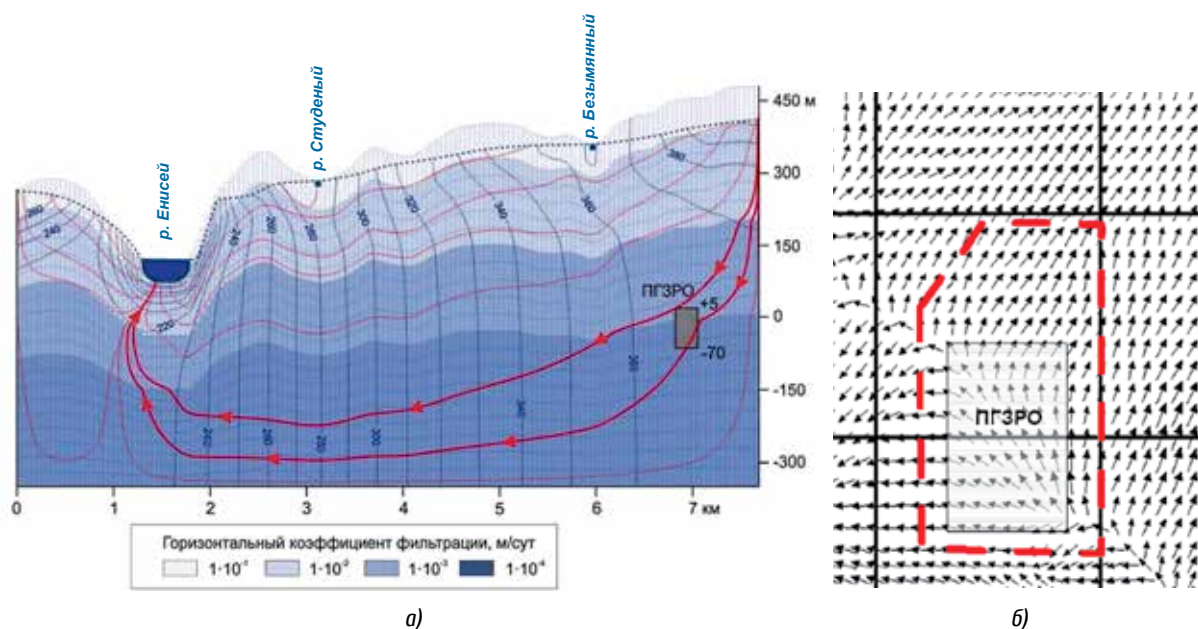
Полученные результаты имеют не только теоретическое, но и прикладное значение и могут быть использованы при разработке методик обращения с ОЯТ и РАО, а также при обосновании безопасности объектов окончательной изоляции высоко- и среднеактивных отходов.

Применение неравновесной модели двойной пористости для описания миграции радионуклидов в районе ПГЗРО на участке «Енисейский» Нижнеканского массива

Примером практического применения разработанных в ИБРАЭ РАН моделей переноса примеси в неоднородных средах является их приложение к исследованию транспорта радионуклидов после разрушения защитных барьеров в районе пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов (ПГЗРО) на участке «Енисейский» Нижнеканского массива горных пород.

Многочисленные исследования миграции примеси в сильно неоднородных средах, проведенные за последние десятилетия, показывают в большинстве случаев неклассический характер переноса частиц. Для трещиновато-пористых сред, характерных для Нижнеканского массива, приближение однородной пористости является недостаточным. В этом случае описание следует строить на базе модели двойной пористости.

Результаты численного моделирования и асимптотического анализа показывают, что радионуклиды с низкой сорбционной способностью достигнут русла реки Енисей через время порядка 3×10^5 – 1×10^6 лет после разрушения технических барьеров безопасности ПГЗРО. Для радионуклидов с высокой сорбционной способностью это время будет в R раз больше, где R — коэффициент задержки вследствие сорбции. При этом режим переноса будет последовательно меняться: классический — неклассический (субдиффузия) — классический с уменьшенной скоростью адвекции. В окружающую среду выйдут лишь изотопы с очень большим периодом полураспада, и уровень радиационного воздействия на окружающую среду не превысит пороговых значений.



Линии тока подземных вод в вертикальной (а) и горизонтальной (б) плоскостях в районе пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов (ПГЗРО) «Енисейский» Нижнеканского массива горных пород

РАЗРАБОТКА НОВЫХ МЕТОДОВ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЙ И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ



**Головизнин
Василий Михайлович**

д.ф.-м.н., зав. отделом
перспективных исследований
и математического моделирования

«Одной из фундаментальных проблем вычислительной математики, актуальной с точки зрения реализации практических задач в сфере энергетики, является проблема «сеточного переноса». «Сеточный перенос» является критически важным элементом математического моделирования таких гидродинамических явлений, как турбулентные течения при больших числах Рейнольдса в элементах энергетических установок, когерентные вихревые структуры в атмосфере и океанах, генерация звука турбулентными струями в задачах аэроакустики».

Аддитивные операторно-разностные схемы (схемы расщепления)

В ИБРАЭ РАН проводятся работы по построению и теоретическому анализу вычислительных алгоритмов приближенного решения сложных нестационарных задач на основе перехода к последовательности более простых задач. Применение аддитивных схем связано с расщеплением оператора (операторов) исходной задачи в сумму более простых для вычислительной реализации. Расщепление проводится на основе различных подходов и эффективно при использовании параллельных компьютеров.

В рамках этих работ проводятся целевые исследования схем расщепления для эволюционных уравнений первого и второго порядка, с разработкой новых вычислительных алгоритмов для нестационарных задач когда расщепляется оператор при производной по времени. Выделены и изучены схемы расщепления для систем эволюционных уравнений, которые включают сопряженные друг другу операторы (подобная структура математических моделей характерна при решении многих прикладных проблем моделирования теплогидродинамических и нейтронно-физических процессов в атомных реакторах).

Разностная схема КАБАРЕ

В 1998 г. в ИБРАЭ РАН была разработана новая разностная схема для простейшего уравнения переноса, получившая наименование КАБАРЕ. В процессе доработки и ряда последовательных обобщений схемы появилась возможность ее применения к таким сложным задачам, как решение многомерных уравнений адвекции — диффузии с доминирующей адвекцией (сеточным переносом) и систем законов сохранения гиперболического типа, моделирование двумерных газодинамических течений в ортогональных координатах и двумерных несжимаемых течений, описываемых уравнениями Навье—Стокса в (P, u, v) и в (w, u, v) переменных, обобщение на четырехугольные косоугольные сетки и неструктурированные гексагональные косоугольные сетки. Дальнейшие исследования направлены на изучение новых возможностей расчета экстремальных ударно-волновых течений и решения актуальных задач аэроакустики в применении к моделированию гидродинамических процессов в атомных реакторах.

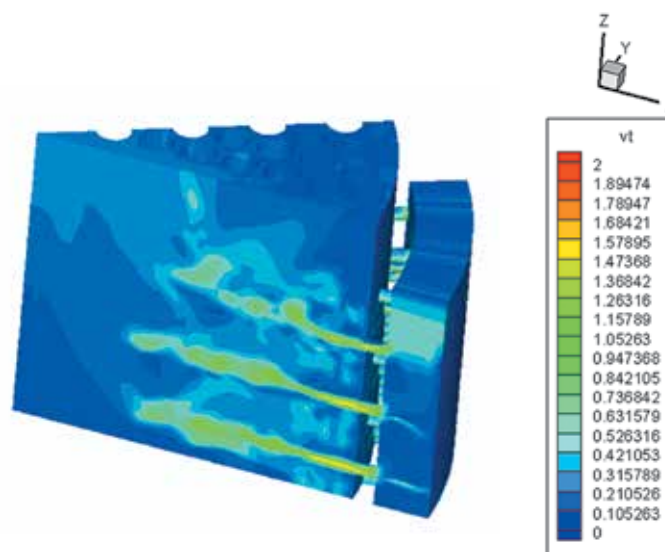
Схема КАБАРЕ представляет собой новую высокоэффективную вычислительную технологию численного решения систем законов сохранения гиперболического типа с доминирующим сеточным переносом, и относится к вычислительным алгоритмам нового поколения, ориентированным на суперкомпьютеры эксафлопсного класса.

Следует отметить, что схема КАБАРЕ не приводит к существенному затуханию акустических возмущений (возмущений порядка $P/P_0 = 10^{-3} - 10^{-6}$), характерному для других известных схем, в том числе и при наличии достаточно сложных пространственно-временных фоновых течений. Расчетным путем было установлено, что схема обеспечивает постоянство амплитуд двумерных вихрей с неподвижной осью, причем как для сжимаемой, так и для несжимаемой жидкости. По своему значению это свойство в вычислительной математике сравнимо с явлением сверхпроводимости в электротехнике. Это позволяет использовать схему КАБАРЕ в расчетах вихревых и турбулентных течений при больших числах Рейнольдса, как в приближении крупных вихрей без явного использования подсеточных моделей турбулентности (LES), так и в рамках прямого моделирования турбулентности при детальном разрешении колмогоровского масштаба (DNS-приближения) без каких-либо настроечных параметров.

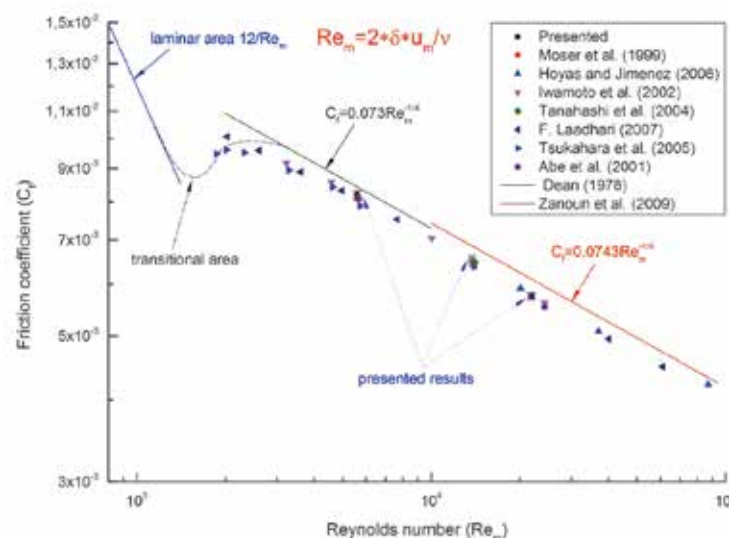
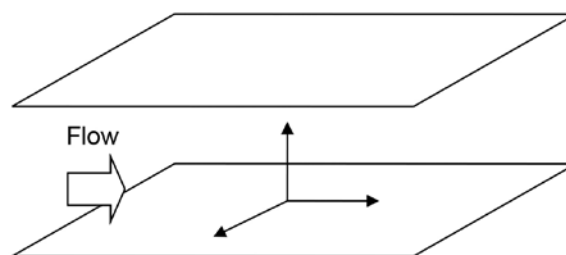
Вычислительный шаблон схемы КАБАРЕ является предельно компактным, уместающимся в одну пространственно-временную расчетную ячейку. Это позволяет очень просто задавать граничные условия в сложных расчетных областях и обеспечивать максимальную вычислительную эффективность распараллеливания при проведении масштабных параллельных вычислений на многопроцессорных вычислительных комплексах.

Стохастические математические модели распространения радионуклидов в сильно неоднородной трещиноватой среде

Одной из первоочередных задач при обосновании безопасности объектов хранения РАО является задача выполнения консервативных оценок рисков, связанных с распространением радиоактивных примесей на большие расстояния. Проведенные в США натурные эксперименты MADE (MacroDispersion Experiment) реального природного масштаба, в которых в естественных условиях исследовалась миграция примеси, инжестированной в водоносный слой, показали, что в неод-



Распределение скорости потока при больших числах Рейнольдса во фрагменте теплообменника со свинцово-висмутовым теплоносителем в проектируемом реакторе СВБР-100



Зависимость коэффициента сопротивления от числа Рейнольдса

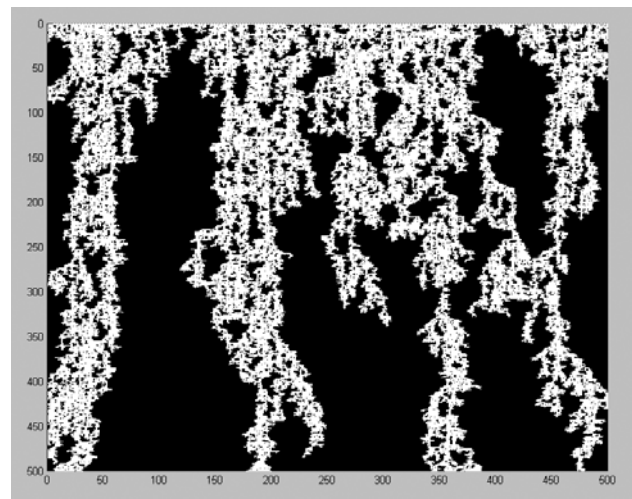
Прямое численное моделирование пристенной турбулентности

нородных средах профили концентрации трассера существенно асимметричны. Они имеют сильно вытянутые в сторону течения хвосты, в которых убывание концентрации примеси не соответствует классическому закону молекулярной диффузии Фике и происходит не по экспоненциальному, а по степенному закону. Такой аномальный характер дисперсии радионуклидов при естественной фильтрации в сильно неоднородных водоносных слоях опасен возможностью их миграции на более значительные расстояния, чем считалось ранее. Используя в описании этих экспериментов модели с дробной пространственной производной ограничены одномерным случаем и неприменимы к расчету анизотропных процессов. Для решения этой проблемы в ИБРАЭ РАН предложена концепция применения многомерных стохастических моделей случайных блужданий (FLM, Fractal Levy Motion) к моделированию полетов Леви.

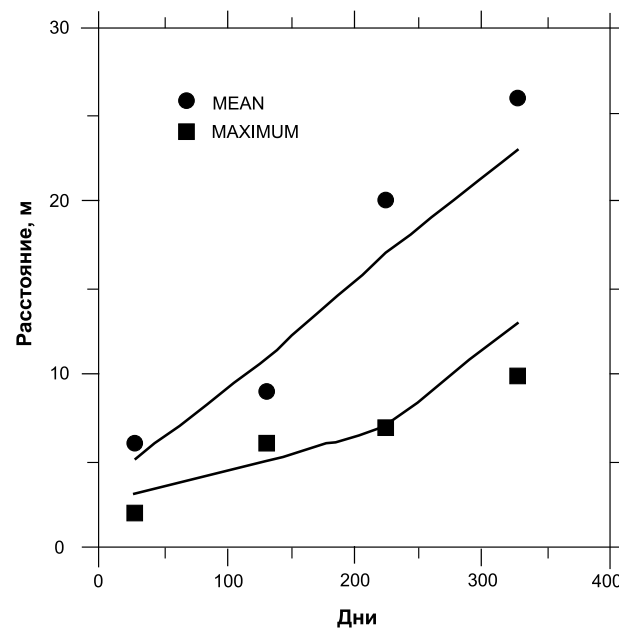
Учитывая широкий спектр возможного характера распространения радионуклидов в неоднородных средах, в ИБРАЭ РАН проведены фундаментальные исследования, по итогам которых на основе оригинальных генераторов случайных величин аппроксимационного типа разработаны одномерная, двумерная и трехмерная стохастические робастные (устойчивые к внешним воздействиям) модели распространения примеси с «тяжелыми» хвостами функции распределения. Эти модели использовались для описания реальных процессов дисперсии радионуклидов в неоднородных средах (в частности, в экспериментах MADE).

Также разработан ряд моделей, относящихся к другому классу стохастических моделей фрактальных блужданий — Fractal Brownian Motion (FBM) с коррелированными приращениями во времени. Они предназначены для описания результатов, полученных в лабораторных условиях при исследовании процессов аномальной дисперсии (как субдиффузии, так и супердиффузии). На основе модели двумерной фрактальной случайной трещиноватой среды реализован алгоритм прямого численного моделирования распространения радиоактивного загрязнения, который позволяет строить анизотропные среды в различных направлениях (как по горизонтали, так и по вертикали).

Созданные в ИБРАЭ РАН стохастические модели представляют собой вычислительную основу для разработки программных кодов, предназначенных для расчета и прогнозирования миграции радионуклидов в неоднородных геологических средах, и решения задач обеспечения безопасности хранения радиоактивных отходов.



Просачивание воды в трещиноватой среде.
Результаты расчета по схеме КАБАРЕ



Зависимости от времени пиковой концентрации (max) и среднего значения (mean) трассера в эксперименте MADE-2 и сравнение с результатами расчетов по двумерной стохастической модели с «тяжелыми» хвостами функции распределения (сплошные линии)

Явно-неявные схемы для нестационарных задач

В вычислительном плане явные схемы имеют несомненные преимущества перед неявными. Это достоинство имеет важное значение при построении вычислительных алгоритмов, которые ориентированы на вычислительные системы параллельной архитектуры. Основной недостаток явных схем связан с жесткими ограничениями на допустимый шаг по времени. Явно-неявные аппроксимации по времени ориентированы на сохранение достоинств как явных схем (вычислительная реализация), так и неявных схем (абсолютная устойчивость).

Большой интерес имеют явные схемы, вычисления в которых организованы по принципу бегущего счета. Такие схемы фактически основаны на расщеплении оператора задачи на два оператора и вынесении на новый временной слой только одного оператора из них. С учетом такой неоднородной аппроксимации по времени говорят о явно-неявных схемах. В отличие от стандартных явных схем, такие схемы являются безусловно устойчивыми, но имеют худшие свойства по аппроксимации. Современный этап теории и практики явно-неявных схем связывается со схемами попеременно-треугольного метода А. А. Самарского. Классические схемы попеременно-треугольного метода строятся как факторизованные операторно-разностные схемы с аддитивным расщеплением оператора задачи (матрицы) на сопряженные друг другу слагаемые.



**Вабищевич
Петр Николаевич**

д.ф.-м.н., зав. лабораторией
численного моделирования
термомеханических процессов

«При приближенном решении краевых задач для нестационарных уравнений безусловно устойчивые схемы строятся на основе неявных аппроксимаций по времени.

Вычислительная реализация таких схем для параболических и гиперболических задач связана с необходимостью решения сеточных эллиптических задач».

ИБРАЭ РАН предложены многослойные модификации попеременно-треугольного метода. Повышение точности достигается за счет корректирующего слагаемого с производной по времени, которое берется с предыдущего временного слоя. Погрешность удается уменьшить на порядок по шагу по времени. Схемы попеременно-треугольного метода традиционно строятся для эволюционных уравнений первого порядка, например, для начально-краевых задач для параболических уравнений. Такие схемы расщепления могут также использоваться при решении многих прикладных проблем, которые связываются с эволюционными уравнениями второго порядка. Представляют интерес факторизованные схемы классического варианта попеременно-треугольного метода для эволюционного уравнения второго порядка. Построение новых схем расщепления базируется на использовании принципа регуляризации операторно-разностных схем классического попеременно-треугольного метода. Рассмотрены задачи со многими операторными слагаемыми, задачи для эволюционных уравнений второго порядка с операторными слагаемыми для первой производной по времени. Методической основой рассмотрения является общая теория устойчивости (корректности) операторно-разностных схем.

Задачи конвекции-диффузии являются типичными для математических моделей механики жидкости и газа. При решении задач конвекции-диффузии естественно ориентироваться на разностные схемы, в которых часть оператора задачи берется с предыдущего временного слоя. Рассмотрены двухслойные явно-неявные схемы, когда главная часть оператора задачи, которая связана с диффузионным переносом, берется с верхнего слоя по времени, а подчиненная (конвективный перенос) берется с нижнего слоя. Такие явно-неявные схемы относятся к классу безусловно устойчивых



Отчетное собрание в ИБРАЭ РАН

схем. Их вычислительная реализация базируется на решении задачи с самосопряженным сеточным эллиптическим оператором на каждом временном слое. Предложены многослойные модификации попеременно-треугольного метода для нестационарных задач конвекции-диффузии. Для повышения точности схем попеременно-треугольного метода добавляется корректирующее слагаемое с производной по времени, которое берется с предыдущего временного слоя.

Многие исследуемые явления и объекты характеризуются многомасштабностью протекающих процессов. Для учета этих факторов строятся специальные прикладные математические модели. При рассмотрении динамических процессов принципиальной является многомасштабность по времени, когда процессы идут с различной скоростью. Она учитывается выделением быстрых и медленных слагаемых в нестационарных уравнениях. Строятся специальные разностные схемы, учитывающие особенности поведения решения. Естественный методологический прием состоит в том, чтобы быстрые процессы рассчитывать с использованием более подробных по времени сеток. Применительно к широкому кругу многомасштабных задач такой подход известен как гетерогенный многомасштабный метод.

ИБРАЭ РАН разработаны явно-неявные неоднородные аппроксимации по времени для задач с быстрыми и медленными составляющими решения на основе схем расщепления. Гетерогенные схемы наиболее естественно связываются со схемами покомпонентного расщепления, когда оператор задачи, описывающий быстрые процессы, расщепляется на сумму однотипных операторов. Такие схемы расщепления относятся к классу схем суммарной аппроксимации. Схемы полной аппроксимации строятся на основе использования векторных аддитивных схем.

Рабочее совещание в лаборатории численного моделирования термомеханических процессов, слева направо: д.ф.-м.н. Вабищевич П. Н., Каменская Д. Д., к.т.н. Токарев Ю. Н., Бутов Р. А., к.ф.-м.н. Дробышевский Н. И.



Рассмотрены схемы декомпозиции области для приближенного решения нестационарных задач для уравнений с частными производными. Наиболее полно специфика нестационарных задач учитывается при использовании безитерационных алгоритмов декомпозиции области. Такие схемы декомпозиции области — регионально-аддитивные схемы — связаны с различными вариантами аддитивных схем (схем расщепления). Для многомерных краевых задач можно использовать методы декомпозиции области с наложением или без наложения подобластей. Методы без наложения подобластей связаны с явной формулировкой обменных условий на их границах.

Построены различные классы регионально-аддитивных схем для нестационарных задач математической физики. Исследование сходимости таких схем проводится на основе общей теории схем расщепления. Схемы декомпозиции области основаны на использовании явно-неявных аппроксимаций по времени с выделением обменных граничных условий, с выделением подобластей налегания.

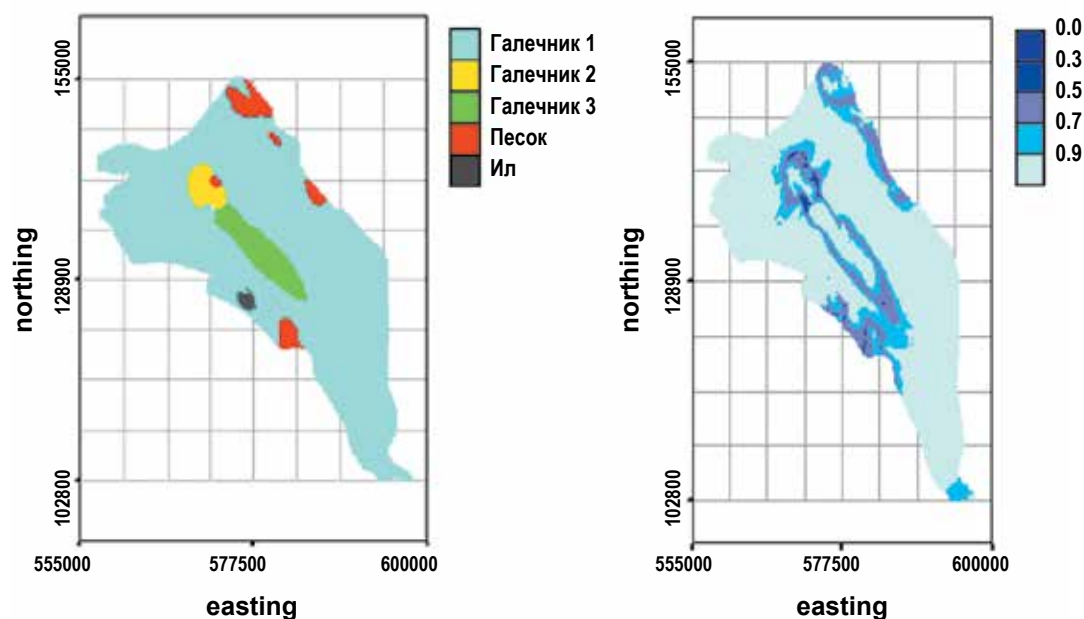
Методы искусственного интеллекта для анализа данных

Актуальность работ по созданию, адаптации и применению методов анализа, обучающихся на исходной информации, связана с необходимостью адекватной обработки данных экологического мониторинга. Основным инструментарием для

анализа являются специально разработанные и верифицированные подходы, основанные на геостатистике (статистической интерпретации данных с учетом их пространственной и временной структуры) и методах машинного обучения. При этом особое внимание уделяется возможности использовать неточно заданную информацию и получать вероятностную оценку пространственной неопределенности результатов.

В ИБРАЭ РАН разработана методология анализа пространственно-распределенных данных с представлением результатов в географической информационной системе. Использование теоретического обоснования используемых методов, позволяет корректно интерпретировать полученные результаты и оценивать неопределенности. Особо следует отметить метод ядерной интерполяции, базирующийся на непараметрическом моделировании функции плотности вероятности. На его основе разработана самообучающаяся нейронная сеть обобщенной регрессии (НСОР), пригодная для использования в режиме реального времени.

Разработанные методы используются в реальных приложениях, в частности, при моделировании распределения радиоактивных загрязнений в результате аварии на Чернобыльской АЭС, при анализе гидрологической ситуации в окрестностях ПО «Маяк» на Южном Урале, при формировании геологической модели для задач миграции радионуклидов, а также в совместных российско-американских проектах, связанных с захоронением РАО.



Восстановление характеристик геологической среды методами искусственного интеллекта. Результаты зонирования гидрогеологического слоя геологической модели полигона Хэнфорд Сайт (США) по литологическим типам с использованием вероятностной модели: (а) карта зон литологических типов; (б) результаты компьютерного восстановления зоны неопределенности классификации (вероятность выбранного класса)



Арутюнян Рафаэль Варназович

д.ф.-м.н., заместитель директора ИБРАЭ РАН
по научной работе и координации
перспективных разработок

«В 1988—1989 гг. ядро коллектива ИБРАЭ РАН под руководством Л. А. Большова было сформировано из групп научных сотрудников — выпускников МФТИ, физфака и факультета вычислительной математики и кибернетики МГУ им. М. В. Ломоносова. Спектр наших научных интересов охватывал широкую область фундаментальных и прикладных задач, от теории элементарных частиц, физики ядра, теории гравитации, физики плазмы и твердого тела, теории взаимодействия излучения с веществом до исследований воздействия умеренных и интенсивных потоков лазерного излучения на конструкционные материалы. Это изначально определило подход к решению стоящих перед Институтом задач в области ядерной и радиационной безопасности: опираясь на обширный и уникальный научный, инженерный и технологический опыт атомной отрасли, основываясь в первую очередь на фундаментальных подходах к описанию процессов и явлений в ядерных установках, развивать методы, модели и программные средства для задач анализа безопасности объектов атомной энергетики, защиты человека и окружающей среды. Прежде всего, применительно к аварийным ситуациям и тяжелым авариям на АЭС. На этой базе удалось существенно улучшить достоверность и предсказательность создаваемого в ИБРАЭ РАН инструментария для анализа и обоснования безопасности».

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В СМЕЖНЫХ ОБЛАСТЯХ ФИЗИКИ

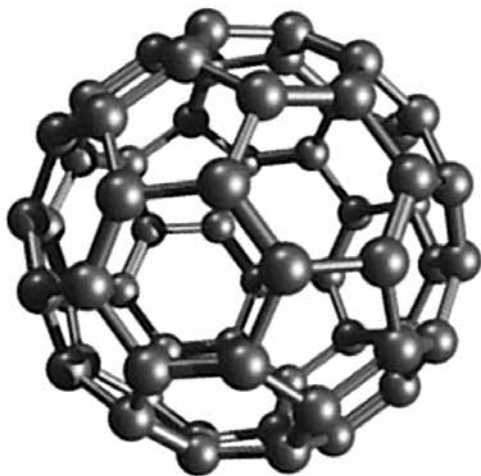
Физика заряженных атомных кластеров. Сверхтяжелые наноатомы

Арутюнян Рафаэль Варназович, д.ф.-м.н.

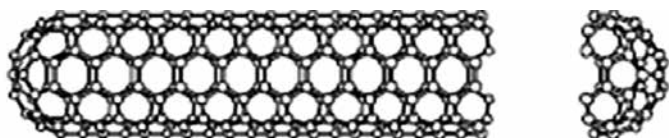
К настоящему времени разработаны и практически реализованы различные способы ускорения микро- и макрочастиц, ионов атомов и элементарных частиц (электроны, протоны). К таким способам относятся ускорение заряженных частиц в линейных ускорителях и в круговых ускорителях (циклотроны и синхротроны). Наибольшие мощности и интенсивности достигнуты на данный момент для ионных пучков в импульсном режиме. Задача получения высокоэнергетических потоков ионов молекул и наночастиц является к настоящему времени значительно менее изученной и представляет большой научный и практический интерес с точки зрения исследования взаимодействия таких потоков с веществом, в том числе в области термоядерных параметров.

Особый интерес представляет случай, когда в качестве ускоряемых электрическим полем частиц используются заряженные до предельного заряда нанотрубки (фуллерены C_{60}^{+Z} , нанотрубки и кластеры из таких объектов — C_N^{+Z} , где N — полное число атомов углерода, Z — целочисленный заряд наночастицы). Эти наночастицы обладают уникальными физическими свойствами, позволяющими получить значительно более высокие значения удельного заряда по сравнению с достигнутыми на сегодняшний день для микрочастиц. В силу, с одной стороны, более высоких прочностных свойств таких объектов по сравнению с частицами, состоящими из других материалов, а с другой стороны — в силу большей величины напряженности предельного электрического поля возникновения автоионной эмиссии на поверхности углеродной частицы (что приводит к большему предельному заряду такой частицы), можно получить значительно большее значение удельного заряда частицы (отношение заряда к массе частицы) и тем самым увеличить скорость и энергию ускоряемых электрическим полем частиц, не изменяя параметры самого ускорительного устройства.

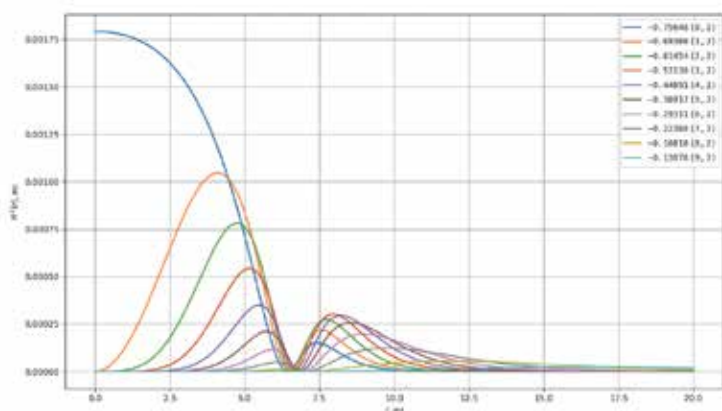
В ИБРАЭ РАН проводятся теоретические исследования возможности ускорения заряженных углеродных наночастиц до высоких энергий, то есть анализируется задача получения интенсивных потоков заряженных высокоэнергетических нанокластеров (фуллеренов, луковичных фуллеренов, фуллеритов, нанотрубок и потоков нанотрубок) с целью: их использования для решения



Молекулярная структура фуллера C_{60}



Углеродная одностенная нанотрубка — лист графена (монослой со структурой графитовой плоскости), свернутый в цилиндр



Объемно-локализованные квантовые состояния для заряженного фуллера C_{60}^{+5}

задач термоядерного синтеза; генерации экстремальных состояний вещества при взаимодействии пучков заряженных углеродных наночастиц с веществом; получения и исследования свойств и применения вещества при сверхвысокой концентрации энергии в виде горячей плазмы с температурой порядка $1\div 10$ кэВ и плотностью порядка плотности конденсированного состояния (10^{22} см $^{-3}$).

Использование интенсивных потоков высокоэнергетических углеродных наночастиц для решения задач, перечисленных выше, является принципиально новым направлением развития науки и технологии. Теоретический анализ и сравнение с экспериментальными данными показывает, что использование заряженных наночастиц на основе углерода C_{60}^{+Z} (фуллерены, нанотрубки, кластеры) позволяет достичь значения скорости $1,0 \times 10^7$ м/с и кинетической энергии на атом 8 МэВ при эффективном ускоряющем потенциале 10^8 В.

Другим направлением является исследование электронных спектров заряженных фуллеренов и луковичных структур. Построены простые физические модели, в рамках которых продемонстрировано существование системы дискретных короткоживущих объемно-локализованных квантовых уровней в потенциалах самосогласованного поля заряженного фуллера и луковичного фуллера. Для электронов, с использованием как аналитических, так и численных методов, показано наличие объемно-локализованных квантовых уровней в диапазоне энергий от 1 до 100 эВ. Экспериментальное подтверждение структуры спектра объемно-локализованных состояний представляет значительный интерес для решения практических задач, включая развитие новых источников когерентного излучения в широком диапазоне длин волн.

Квантовая и классическая динамика частиц со спином во внешних физических полях

Обухов Юрий Николаевич, к.ф.-м.н.

Вывод и исследование уравнений движения физических объектов со спином (пробных частиц и протяженных тел, классических и квантовых) в искривленном пространстве-времени с произвольной метрикой под воздействием внешних полей представляет собой фундаментальную проблему в теоретической физике. Знание общих квантово-механических и классических уравнений движения частицы и динамики спина необходимо для проверки оснований фундаментальной



Фридрих Хель (F. W. Hehl) Кёльнский университет (University of Cologne) приехал в ИБРАЭ прочитать лекцию «Калибровочный подход в теории гравитации»

физики, таких, как релятивистская инвариантность, возможные нарушения лоренцевой симметрии, принцип эквивалентности, геометрическая структура пространства-времени, природа темной материи и темной энергии (и, тем самым, для понимания эволюции вселенной). Без таких уравнений невозможно корректно описать поведение таких астрофизических систем, как двойные звезды, и определить свойства излучаемых этими системами электромагнитных и гравитационных волн. Вывод данных уравнений принципиально важен для решения практических задач в приложении к высокоточным экспериментам в физике высоких энергий, к небесной механике и релятивистской астрометрии, космической навигации, для создания новых физических приборов, в частности, новых детекторов гравитационных волн.

Получено полное релятивистское квантово-механическое описание динамики спина дираковских фермионных частиц в произвольных внешних полях. Рассмотрены проявления принципа эквивалентности для спина в структуре элементарных частиц, его экспериментальная проверка и обобщения. Учтено наличие у частиц аномального магнитного и электрического дипольного моментов и проведено соответствующее обобщение ковариантного уравнения Дирака, описывающего гравитационные и электромагнитные взаимодействия частиц со спином $1/2$. Определено влияние вращения и тяготения Земли на движение спина в прецизионных экспериментах с частицами высоких энергий в ускорителях и накопительных кольцах.

Проведено исследование возможности удержания холодных и ультра-холодных нейтронов в макроскопических и микроскопических полях (сверхсильных магнитных, инерциальных,

**Данная работа
удостоена первой
премии Объединенного
института ядерных
исследований (ОИЯИ)
за 2017 год**



Обухов Юрий Николаевич

к.ф.-м.н., с.н.с. лаборатории
теоретической физики

«Динамика физических частиц со спином под воздействием внешних полей является фундаментальной проблемой в теоретической физике.

Ее исследование важно как для проверки оснований физики (лоренцевой симметрии, принципа эквивалентности), так и для решения практических задач в приложении к прецизионным экспериментам в физике частиц высоких энергий, небесной механике и релятивистской астрометрии, космической навигации, созданию новых физических приборов (напр. детекторов гравитационных волн), реализации безопасного использования атомной и термоядерной энергии».



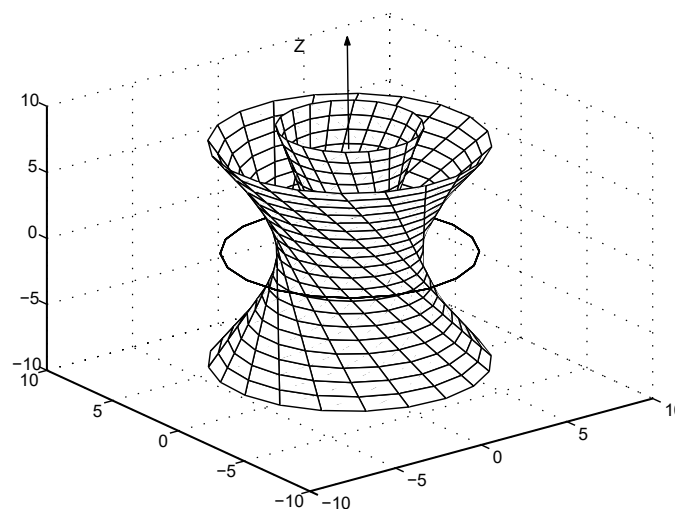
гравитационных) в произвольных физических средах. Результаты работы представляют значительный интерес для теоретической разработки и конструирования ловушек нового типа, способных удерживать холодные и ультра-холодные нейтроны. Такие ловушки имеют большую практическую ценность для исследования таких фундаментальных свойств нейтрона, как время жизни, магнитный и электрический дипольный моменты, и получения оценок на возможные эффекты физических взаимодействий beyond the Standard Model (BSM).

Развитие подходов к созданию квантовой теории гравитации

Буринский Александр Янович, д.ф.-м.н

Электрослабый сектор Стандартной Модели (СМ) элементарных частиц представляет собой развитие квантовой электродинамики (КЭД), дополняемое полем Хиггса, которое дает массу всем частицам. При этом изменяются некоторые существенные положения КЭД, такие, как киральная симметрия

Обухов Ю. Н. читает лекцию «Открытие гравитационных волн» в рамках семинара ИБРАЭ РАН по теоретической и математической физике, который проводится в Институте на регулярной основе с 2013 года



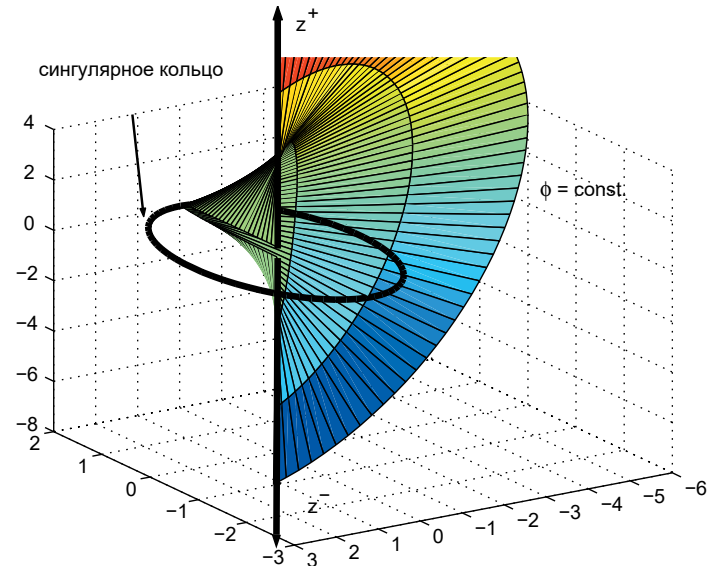
Проблема источника решения Керра. Вихревая конгруэнция Керра переходит аналитически через «мост Эйнштейна-Розена» на зеркальное пространство, изменяя знаки заряда и массы

лептонов, и сам механизм возникновения массы связывается с непертурбативным эффектом нарушения калибровочной симметрии. В то же время в СМ сохраняется старая проблема несовместимости квантовой теории с гравитацией, что препятствует рассмотрению СМ как единой теории всех сил и взаимодействий.

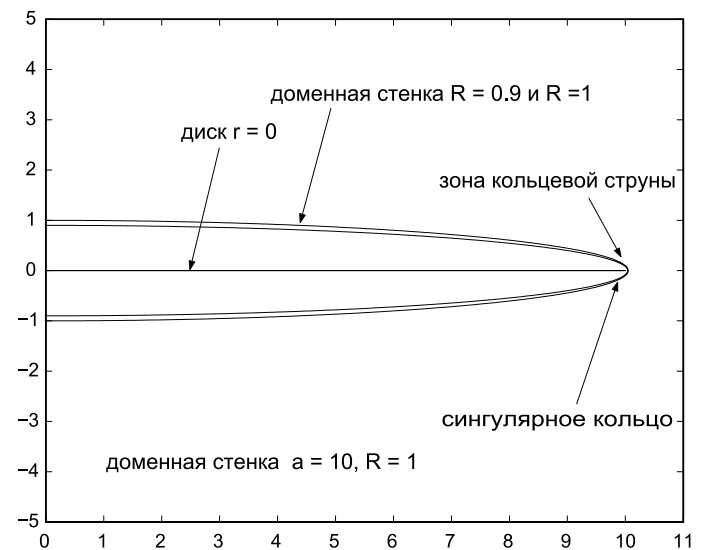
Принципиальным прорывом в изучении этой проблемы явилось ее рассмотрение с позиций теории гравитации, на базе решения Керра–Ньюмена. Черные дыры (ЧД) неоднократно предлагались на роль элементарных частиц, однако основным препятствием для реализации такого подхода являлась слабость гравитационного взаимодействия, которое для ЧД Шварцшильда приводило к ее влиянию на частицы только на Планковских масштабах порядка «гравитационного радиуса» $r_g = 2M \sim 10^{-33}$ см. Ситуация изменилась с открытием решения Керра–Ньюмена (КН) для вращающейся и заряженной ЧД, зона влияния которой $a = J/M$ определяется спином J , и становится существенной для частиц малой массы M , достигая для электрона его Комптоновских размеров, порядка 10^{-22} см. В этой зоне пространство становится двулистным и возникает «мост Эйнштейна–Розена», проход в «зеркальный» мир, в котором меняются знаки массы и заряда. Это породило в 1965 году «проблему источника решения Керра», которая была решена построением суперсимметричного источника, в котором суперсимметрия гарантирует стабильность решения и его единственность.

Решение КН проливает свет на проблему несовместимости квантовой теории с гравитацией. Будучи исходно гравитационным решением, оно проявляет связь с элементарными частицами, т. к. соответствует гравитационному и электромагнитному полю электрона, отвечая на вопрос, «какая структура электрона была бы совместима с гравитацией»? Оказывается, что электрон должен иметь структуру, подобную MIT и SLAC моделям «мешков» в теории адронов. «Мешок» заполнен полем Хиггса, которое закрывает проход в зеркальное пространство и порождает массу у поля Дирака в соответствии со структурой Стандартной Модели. Решение Керра–Ньюмена однозначно определяет форму «мешка», решая проблему совместимости с гравитацией.

Результаты исследований опубликованы в ЖЭТФ 148 (2015) 228 и ЖЭТФ 148 (2015) 937, Int.J.Mod.Phys. D 26 (2017) 1743022.

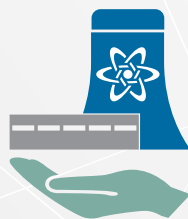


Векторный потенциал КН формирует петлю Вильсона, квантуя спин источника



Радиальный профиль дискообразного гравитирующего «мешка», формируемый доменной стенкой, интерполирующей между суперсимметричным вакуумом, образуемым полем Хиггса внутри «мешка», и внешним гравитационным решением Керра–Ньюмена

Разработка методов, инструментария и проведение расчетных исследований безопасности АЭС



*За три прошедших десятилетия ИБРАЭ РАН
накоплен богатый опыт обоснования
безопасности АЭС с использованием современных
методик. В их основе лежат созданные
в Институте верифицированные компьютерные
коды и специализированные программные
средства для численного моделирования
нейтронно-физических, физико-химических,
теплогидравлических, радиологических и
других процессов в АЭС с ядерными реакторами
различных типов, в том числе перспективными
ядерными реакторными установками нового
поколения на быстрых нейтронах
с жидкометаллическим теплоносителем.*



Проблематика исследований:

- создание подробных моделей физических, химических, механических процессов, определяющих функционирование АЭС в различных режимах работы, в том числе при авариях, включая тяжелые;
- разработка и внедрение в расчетную практику проектно-конструкторских организаций расчетных кодов и интегрированных программных комплексов для анализа безопасности АЭС с реакторами водо-водяного типа на тепловых нейтронах и АЭС с реакторами на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем;
- исследования в сфере цифровизации атомной энергетики в рамках разработки программно-технического комплекса «Виртуально-цифровая АЭС с ВВЭР»;
- участие в российских и международных научно-исследовательских проектах, посвященных изучению физико-химических и теплогидравлических процессов, протекающих в различных режимах работы АЭС, исследованию подходов к верификации программных комплексов и оценке экспериментальных данных.



Стрижов Валерий Федорович

д.ф.-м.н., зам. директора ИБРАЭ РАН
по разработке интегрированных программных
комплексов анализа безопасности АЭС и ЯТЦ

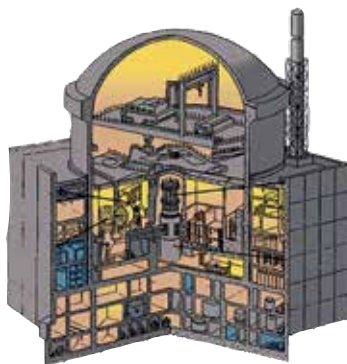
«ИБРАЭ РАН в течение многих лет специализируется в области комплексных исследований проблем безопасности объектов атомной энергетики и промышленности, включая ядерный топливный цикл (ЯТЦ), с использованием современных компьютерных технологий.

Специалистами Института разработаны подробные физические модели процессов в ядерных реакторах различных типов, созданы и внедрены в эксплуатацию современные компьютерные коды, позволяющие с высокой точностью моделировать развитие проектных и запроектных аварий на АЭС, в том числе тяжелых. Институт проводит инновационные исследования, направленные на решение проблем замкнутого ядерного топливного цикла и развития малой атомной энергетики, принимает активное участие в реализации проекта «Коды нового поколения» проектного направления «Прорыв» в рамках Федеральной целевой программы «Ядерные энерготехнологии нового поколения на период 2010—2015 годов и на перспективу до 2020 года».

АНАЛИЗ БЕЗОПАСНОСТИ АЭС С РУ ВВЭР ПРИ ЗАПРОЕКТНЫХ И ТЯЖЕЛЫХ АВАРИЯХ С ПЛАВЛЕНИЕМ ТОПЛИВА И ВЫХОДОМ ПРОДУКТОВ ДЕЛЕНИЯ ЗА ПРЕДЕЛЫ БАРЬЕРОВ БЕЗОПАСНОСТИ

Тяжелые запроектные аварии на АЭС — явление крайне редкое. Однако задачи обеспечения ядерной радиационной безопасности АЭС являются приоритетными на всех этапах ее «жизненного цикла», начиная с проектирования и заканчивая выводом из эксплуатации и утилизацией. Практическая реализация этих задач требует проведения целенаправленных фундаментальных и прикладных научно-технических исследований. Исторически такие исследования направлены прежде всего на обоснование безопасности реакторных установок (РУ) водо-водяного типа на тепловых нейтронах (к которым, в частности, относятся РУ ВВЭР).

ПРОЕКТНАЯ — авария, для которой в проекте атомной станции определены исходные события и конечные состояния и предусмотрены системы безопасности, обеспечивающие при независимом от исходного события отказе одного из элементов систем безопасности, учитываемом в проекте атомной станции, или при одной, независимой от исходного события, ошибке персонала ограничение ее последствий установленными для таких аварий пределами (НП-001-15). Такая авария не ведет к серьезным повреждениям активной зоны реактора, а ее последствия ограничиваются и устраняются системами безопасности в составе проекта РУ АЭС и действиями персонала.



ЗАПРОЕКТНАЯ — авария, вызванная не учитываемыми для проектных аварий исходными событиями или сопровождающаяся дополнительными по сравнению с проектными авариями отказами элементов систем безопасности сверх единичного отказа, реализацией ошибочных решений персонала (НП-001-15). Ослабление последствий достигается управлением запроектной аварией и/или реализацией планов мероприятий по защите персонала и населения.

ТЯЖЕЛАЯ — запроектная авария с повреждением твэлов выше максимального проектного предела (НП-001-15). При этом оказываются превышены дозовые пределы для проектных аварий, что обуславливает необходимость проведения комплексных мероприятий по защите персонала и населения вплоть до эвакуации населения.

Тяжелоаварийный расчетный код СОКРАТ

Область применения

Расчетный код (РК) СОКРАТ предназначен, прежде всего, для моделирования тяжелых запроектных аварий с плавлением активной зоны реакторных установок водо-водяного типа и представляет собой систему интегрированных программных модулей. Реализованные в них вычислительные алгоритмы основаны на использовании физических моделей, детально описывающих процессы (или их совокупность), протекающие при тяжелой аварии в ядерном реакторе. Объединение модулей в единый программный комплекс дает возможность проводить сквозное детальное моделирование всех существенных стадий тяжелых аварий и получать полную картину развития аварии с момента ее возникновения и вплоть до разрушения активной зоны реактора и выхода радиоактивных продуктов деления (ПД) за пределы защитной оболочки АЭС.

Базовая структура

Базовая структура РК СОКРАТ включает в себя программные модули:

- СВЕЧА — моделирование взаимосвязанных физико-химических процессов разрушения активной зоны реактора при тяжелой аварии;
- HEFEST — моделирование теплофизических процессов в напорной камере реактора после перемещения в нее материалов разрушающейся активной зоны (кориума) и внутрикорпусных устройств на поздних стадиях тяжелой аварии, а также моделирование процессов разрушения корпуса реактора расплавом кориума.
- РАТЕГ — моделирование теплогидравлических процессов в РУ ВВЭР (разработка ВНИИЭФ);

Базовая версия расчетного кода СОКРАТ/В1 в 2010 г. аттестована Ростехнадзором для комплексного численного моделирования динамики физико-химических, теплогидравлических и термомеханических процессов, происходящих в реакторных установках с водяным теплоносителем ВВЭР при тяжелых запроектных авариях.

Расширенная версия кода СОКРАТ/В3

Расширенная версия расчетного кода СОКРАТ/В3 включает несколько десятков программных модулей и физических моделей, разработанных ИБРАЭ РАН совместно с организациями-партнерами (АО «АТОМПРОЕКТ», ВНИИЭФ, Концерн «Росэнергоатом»). Она обеспечивает расчет всех основных параметров, необходимых для обоснования радиационной безопасности АЭС как в режимах нормальной эксплуатации и проектной аварии, так на внутрикорпусной стадии тяжелых запроектных аварий с плавлением активной зоны, и детально описывает основные процессы в реакторных установках ВВЭР:

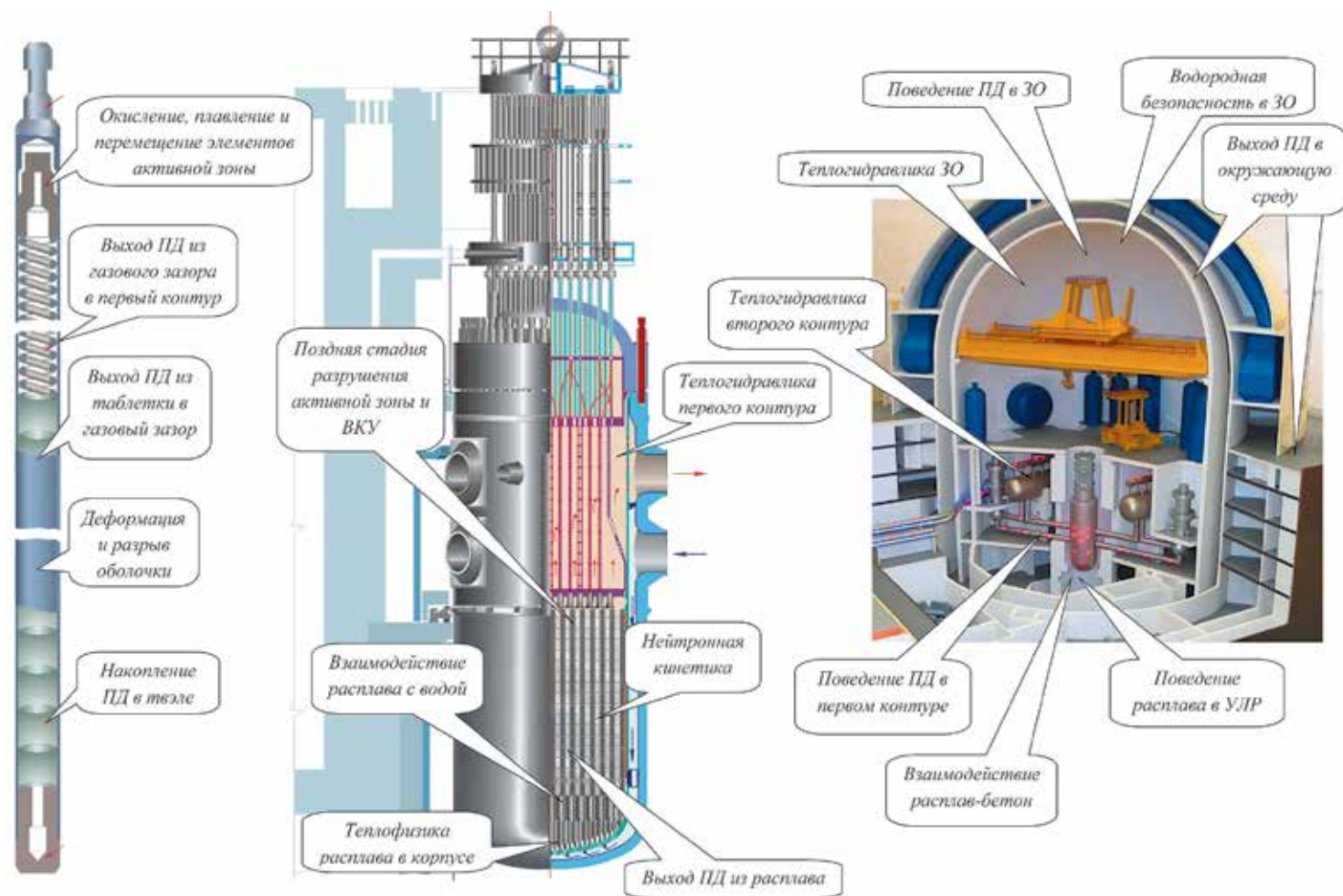
- накопление радиоактивных веществ в топливе в течение топливной кампании, изменение радионуклидного состава топлива, мощности остаточного энерговыделения, активности ПД;
- выход радиоактивных веществ из топлива в газовый зазор твэла, а после разрыва оболочки твэла – в первый контур;



Киселев Аркадий Евгеньевич

д.т.н., зав. отделением анализа безопасности ядерных энергетических установок

«С 1989 года мы сотрудничаем с комиссией по ядерному регулированию США и французскими регулирующими органами в области совершенствования средств анализа безопасности ядерных реакторов — компьютерных кодов. К разработке отечественных кодов, сопоставимых по возможностям с американским тяжелоаварийным кодом MELCOR и европейским ASTEC, в ИБРАЭ РАН приступили еще в конце 1990-х гг. В кооперации с ведущими организациями отрасли (ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ, АО «АТОМПРОЕКТ», ФГБУ НИЦ «Курчатовский Институт», АО ОКБ «Гидропресс», АО «Атомэнергопроект», ГНЦ РФ-ФЭИ, АО «ЭНИЦ») был создан сквозной расчетный код СОКРАТ, который позволяет моделировать процессы, происходящие при тяжелых запроектных авариях на реакторах с водяным теплоносителем (ВВЭР, BWR, PWR), начиная с исходного события и заканчивая выходом радионуклидов в окружающую среду. Код широко применяется в ИБРАЭ РАН и на предприятиях отрасли для решения сложных наукоемких задач обоснования безопасности АЭС при тяжелых авариях».

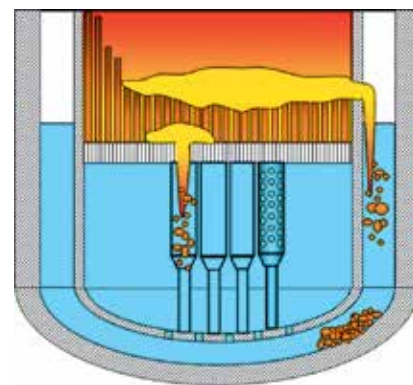


- выход радиоактивных веществ и конструкционных материалов из расплава топлива и внутрикорпусных устройств;
- перенос радиоактивных веществ в гидравлических контурах реакторной установки;
- взаимодействие расплава кориума с теплоносителем;
- выход водяного пара, горючих газов, радиоактивных веществ и конструкционных материалов из расплава активной зоны при взаимодействии кориума с жертвенным материалом УЛР и в результате взаимодействия расплава с бетоном;
- поведение продуктов деления в защитной оболочке с учетом работы систем безопасности и выход ПД в окружающую среду.

Объекты моделирования РК СОКРАТ

Верификация РК СОКРАТ

Постоянная верификация кода и лежащих в его основе физических моделей является одной из важнейших составляющих его разработки и эксплуатации. Модели и алгоритмы РК СОКРАТ прошли всестороннее тестирование на широком наборе данных, полученных в результате экспериментов и натурных измерений, выполненных в России и за рубежом. Специалисты ИБРАЭ РАН принимали участие в ряде международных экспериментальных программ: CORA, QUENCH (Германия), PHEBUS (Фран-



Общая схема заполнения расплавом напорной камеры РУ ВВЭР при тяжелой аварии, реализованная в РК СОКРАТ (модули VAPEX-M и HEFEST)



ция), РАСПЛАВ, МАСКА (Россия — ОЭСР), LOFT (США — ОЭСР), PBF, PARAMETER (МНТЦ), ICSP MASLWR (МАГАТЭ), ATMI-2 (ОЭСР), ERCOSAM-SAMARA, ATLAS (ОЭСР). В настоящее время верификация и кросс-верификация моделей РК СОКРАТ продолжается в рамках следующих международных проектов:

- Расчетно-аналитический бенчмарк BSAF (BSAF2) по моделированию протекания тяжелой аварии на энергоблоках 1-3 АЭС «Фукусима Дайичи» (под эгидой ОЭСР);
- Проект FUMAC (под эгидой МАГАТЭ) по исследованию термомеханики оболочек твэлов с сильновыгоревшим топливом ВВЭР и PWR в условиях аварий с потерей теплоносителя;
- Проект ACTOF (под эгидой МАГАТЭ) по исследованию аварийно-устойчивого топлива;
- Бенчмарк PKL-4 с использованием интегральных теплогидравлических экспериментов на установке PKL III.

Практическое применение

РК СОКРАТ введен в эксплуатацию и широко используется ведущими российскими проектно-конструкторскими и научными организациями (ИБРАЭ РАН, АО «АТОМПРОЕКТ», АО «Атомэнергопроект», НИЦ «Курчатовский институт», АО ОКБ «Гидропресс») при анализе запроектных тяжелых аварий АЭС с реакторами на тепловых нейтронах с водяным теплоносителем (ВВЭР, PWR, BWR), для обоснования водородной безопасности, обоснования безопасности и проектирования систем удержания и локализации расплава, при детерминистической поддержке ВАБ-2. Большое значение для развития международного сотрудничества в сфере безопасности атомной энергетики имеют образовательные курсы, проводимые ИБРАЭ РАН для специалистов зарубежных надзорных органов в странах-импортерах российских атомных технологий (Болгария, Венгрия, Индия, Ирак, Китай, Словакия, Украина, Финляндия и др.).

Региональный семинар МАГАТЭ по анализу тяжелых аварий. 28 мая – 1 июня, 2018 г. Триест, Италия

Обсуждение вопросов разработки Сократ/ВЗ с коллегами из АО «АТОМПРОЕКТ», слева направо: Безлепкин В. В., директор Управления, АО «АТОМПРОЕКТ»; Томащук Д. Ю., н.с., ИБРАЭ РАН; Сидоров В. Г., начальник лаборатории КМР, АО «АТОМПРОЕКТ»; Долженков Е. А., инж. ИБРАЭ РАН; Долганов Р. А., н.с., АО «АТОМПРОЕКТ»





Долганов Кирилл Сергеевич

к.т.н., зав. лабораторией анализа запроектных аварий на АЭС

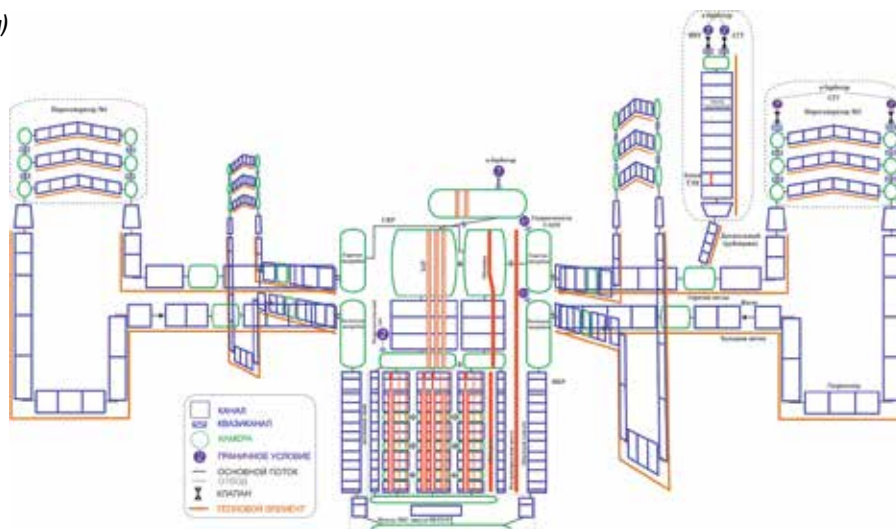
«В 2011–2018 гг. ИБРАЭ РАН при поддержке Госкорпорации «Росатом» принимал участие в проектах ОЭСР BSAF и BSAF-2, посвященных сравнительному анализу результатов численного моделирования аварии на энергоблоках 1–3 АЭС «Фукусима Дайичи» при помощи ведущих тяжелоаварийных кодов (MELCOR, MAAP, ASTEC, СОКРАТ и др.). Целью этих проектов была расчетная поддержка деятельности японской стороны по ликвидации последствий аварии. С использованием подробных данных о реакторной установке и об аварии нами были выполнены расчёты по коду СОКРАТ/ВЗ, в результате которых мы уточнили степень разрушения активных зон, дали прогноз возможного местоположения и состава кориума и глубины абляции бетонного основания расплавом, рассчитали радиоактивный выброс, возможную степень радиоактивного заражения отдельных помещений. Полученные результаты используются ТЕРСО для разработки стратегии и средств извлечения топлива из реакторов. В свою очередь, полученные данные со станции использованы нами для верификации моделей кода СОКРАТ/ВЗ, а взаимодействие с участниками проекта позволило определить пути дальнейшего развития кода СОКРАТ/ВЗ».

Анализ аварии на АЭС «Фукусима»

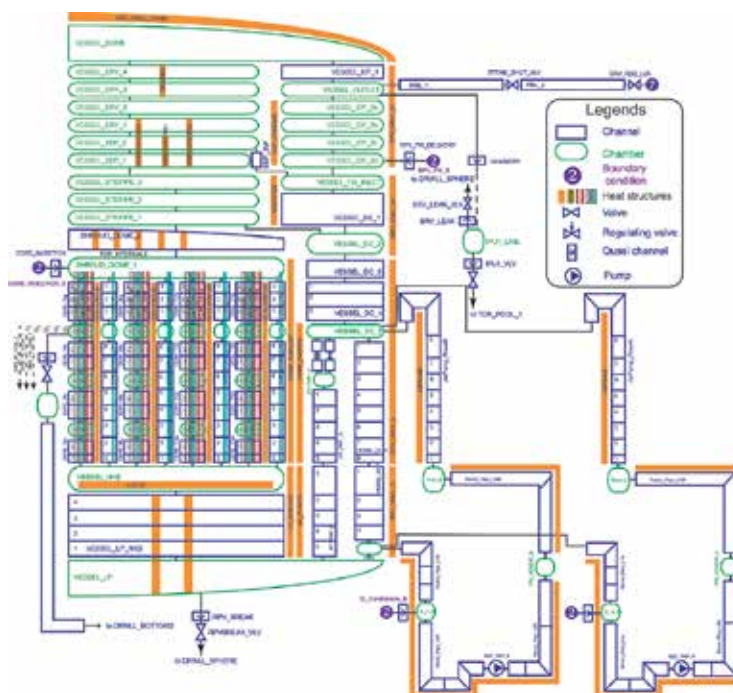
11–13 марта 2011 г. был проведен численный анализ тяжелой запроектной аварии на АЭС «Фукусима-1» («Фукусима Дайичи»), дан подробный прогноз состояния активных зон и бассейнов выдержки ОЯТ энергоблоков 1–3. Этот прогноз в основном подтвердился, а ход процесса разрушения активной зоны реакторов был предсказан с большой достоверностью.

С июня 2012 г. по 2018 г. РК СОКРАТ регулярно проходил кросс-верификацию с ведущими мировыми тяжелоаварийными кодами (MELCOR, MAAP, ATHLET-CD, ASTEC)

а)



б)



Примеры нодализационных схем СОКРАТ для различных РУ
а – ВВЭР, б – ВВР-4 («Фукусима-1»)



в рамках бенчмарков BSAF и BSAF2, организованных Токийской энергетической компанией (TEPCO) и Европейской организацией экономического сотрудничества и развития (OECD/NEA) с участием специалистов из США, Франции, Германии, Японии, Испании, Кореи и Швейцарии. Задачей бенчмарка являлось восстановление хода аварии на энергоблоках 1–3 АЭС «Фукусима Дайичи» и расчетная поддержка TEPCO в части данных о степени разрушения активных зон, корпусов реакторов, бетонного основания контейнмента, данных о расположении расплава топлива, его составе и характеристиках.

Отделение анализа безопасности ядерных энергетических установок.

Слева направо, сидят: Томащук Д. Ю, к.т.н. Долганов К. С., Долженков Е. А., зав. отделением д.т.н. Киселев А. Е.; стоят: Капустин А. В., Томащук В. А., Рыжов Н. И., к.т.н. Филиппов М. Ф., Чалый Р. В., Фокин А. Л.

Основные направления развития

Работы по дальнейшему развитию РК СОКРАТ проводятся в двух научных направлениях. Первое включает в себя совершенствование действующей версии РК СОКРАТ/ВЗ, участие в международных бенчмарках с целью верификации кода, адаптация физических моделей и вычислительных алгоритмов под различные проекты реакторов на тепловых нейтронах с водяным теплоносителем.

Второе научное направление посвящено фундаментальным исследованиям проблем безопасности существующих и перспективных реакторов на быстрых нейтронах (БР) с жидкометаллическим теплоносителем, а также разработке нового поколения расчетных кодов для моделирования их поведения в эксплуатационных и аварийных режимах. В настоящее время в ИБРАЭ РАН на платформе РК СОКРАТ создана версия кода СОКРАТ-БН, предназначенного для расчета физических процессов в БР-реакторах с натриевым теплоносителем.

60 — число специалистов, прошедших обучение и методическую подготовку к применению РК СОКРАТ для анализа тяжелых аварий на АЭС с реакторами ВВЭР.

28 — общее количество энергетических реакторных установок с водяным теплоносителем, находящихся в эксплуатации в России.

РАДИОЛОГИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ В ОБОСНОВАНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ АЭС С ВВЭР

По оценкам ведущих международных экспертов в атомной области, к 2025 году более 50% новых мощностей мировой ядерной энергетики будут приходиться на российские реакторные установки ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200, которым отдает предпочтение большинство стран, заинтересованных в строительстве новых АЭС на своей территории. Это обуславливает важность и актуальность осуществляемых ИБРАЭ РАН научных исследований, направленных на обоснование безопасности реакторных установок водо-водяного типа.

Иностранные регуляторы на основе стандартов МАГАТЭ и МКРЗ устанавливают требования по применению современных подходов к радиологическому моделированию и расчетам радиологических последствий при обосновании безопасности АЭС, зонировании территории вокруг АЭС. С учетом строительства новых блоков АЭС, продления сроков эксплуатации работающих блоков и других видов деятельности, требующей подготовки отчетов по обоснованию безопасности, Российской Федерации необходимо иметь аттестованное, соответствующее стандартам МАГАТЭ и МКРЗ и современному уровню моделирования программное средство для проведения многовариантных расчетов возможных радиологических последствий ЧС с радиационным фактором, обусловленных атмосферными выбросами.

В 2017 году специалистами отделения анализа безопасности ядерных энергетических установок и отделения развития систем аварийной готовности и реагирования ИБРАЭ РАН был успешно реализован проект по созданию инструментария для обоснования безопасности действующих и проектируемых АЭС с ВВЭР при адекватном учете тяжелых аварий с разрушением активной зоны реакторов. Современными инструментами, обеспечивающими эффективное моделирование событий и физических процессов при тяжёлых авариях,

начиная от инициирующего события до потенциального радиоактивного выброса в окружающую среду, моделирование атмосферного переноса примеси и анализ дозовых нагрузок на население, являются разработанные в ИБРАЭ РАН аттестованные программные средства (коды) СОКРАТ и НОСТРАДАМУС. Совместное использование этих кодов обеспечивает сквозной согласованный расчет всех стадий аварийного процесса, начиная от исходного события аварии, и адекватную оценку доз облучения населения.

Данные по параметрам источника выброса, полученные с использованием тяжелоаварийного кода СОКРАТ, передаются в программное средство (ПС) НОСТРАДАМУС v.10, созданное на базе моделей аттестованного программного средства НОСТРАДАМУС. ПС поддерживает возможность проведения многовариантных расчетов параметров

Чтение курса лекций и проведение практических занятий для иностранных специалистов из Нигерии по теме «Применение расчетных кодов для анализа безопасности ЯЭУ» в ЦИПК Росатома





радиационной обстановки на основе модели WRF-ARW, формирующей наборы трехмерных метеорологических полей за определенный промежуток времени (порядка одного года) с использованием данных реанализа и последующей их статистической обработкой. Данный подход отвечает современным мировым стандартам в области обоснования безопасности и позволяет обеспечить высокий уровень решения задач. Он априори соответствует требованиям руководств по моделированию последствий аварий с учетом климатических, географических и метеорологических условий размещения промплощадки ЯРОО, использование которых регламентировано, в том числе, в международной практике решения задач такого класса.

Основным результатом моделирования в рамках разработанных в ИБРАЭ РАН технологий являются расчетные поля возможных доз облучения населения (эквивалентные дозы, приходящиеся на различные органы человеческого тела, эффективная доза, поглощенные дозы, приходящиеся на различные органы человеческого тела и общая поглощенная доза, ОБЭ-взвешенные дозы) в стандартном 6-ти групповом подходе с заданными уровнями доверия (в том числе с широко используемыми в мире: 0.5, 0.95 и 0.995). Объем задаваемых целевых функций позволяет работать как в концепции репрезентативного индивида, так и в концепции критической группы, что открывает возможность проводить сопоставления результатов как с российскими, так и международными критериями.

С 2018 года ИБРАЭ РАН реализует проект по созданию нового программного средства для проведения многовариантных расчетов возможных радиологических последствий, обусловленных атмосферными выбросами в аварийных ситуациях (включая запроектные тяжелые аварии), при обосновании безопасности АЭС с реакторами ВВЭР. Разрабатываемое программное средство соответствует всем существующим современным российским и международным требованиям в области обоснования безопасности АЭС с водо-водяными реакторами в части моделирования атмосферного переноса и расчета дозовых нагрузок на население.

Специалисты отделения анализа безопасности ядерных энергетических установок и отделения развития систем аварийной готовности и реагирования ИБРАЭ РАН

Сотрудники ИБРАЭ РАН к.т.н. Долганов К. С. и к.т.н. Киселев А. А. читают лекции по кодам СОКРАТ/ВЗ и НОСТРАДАМУС в рамках Регионального семинара МАГАТЭ по анализу тяжёлых аварий, 2018 г.



ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС «ВИРТУАЛЬНО-ЦИФРОВАЯ АЭС С ВВЭР»

*Научный руководитель ИБРАЭ РАН
Большов Л. А., научный руководитель
АО «ВНИИАЭС» Соловьев С. Л. и
заместитель директора ВНИИАЭС-НТП,
директор отделения математического
моделирования и тренажеростроения
Чернаков В. А. на первой демонстрации
ПТК «Виртуально-цифровая АЭС с
ВВЭР» комиссии во главе с первым
заместителем ген. директора
по операционному управлению
ГК «Росатом» Локшиным А. М.,
руководителями и топ-менеджерами
АО «Концерн Росэнергоатом»,
АО «ВНИИАЭС» и других отраслевых
предприятий*

В последние годы несомненной тенденцией во всех областях промышленности является их цифровизация. В атомной энергетике одним из перспективных направлений в этой области является создание цифрового двойника АЭС, наличие которого уже в ближайшее время может стать обязательным атрибутом для продажи проектов на международном рынке. Цифровой двойник является виртуальной моделью объекта, позволяющей отслеживать его состояние на всех этапах жизненного цикла с целью предотвращения возможных коллизий данных, оптимизации обслуживания и повышения эффективности использования объекта.

В АО «Концерн Росэнергоатом» задумались о необходимости создания виртуальных моделей АЭС уже давно. В 2009 г. стартовала разработка концепции и технологии «Виртуальной АЭС с ВВЭР». С 2015 г. началась активная стадия проекта с наименованием «Разработка программно-технического комплекса «Виртуально-цифровая АЭС с ВВЭР». Основные исполнители работ: АО «ВНИИАЭС» и ИБРАЭ РАН. Финансирование осуществляется за счет средств ФРКП АО «Концерн Росэнергоатом».

Программно-технический комплекс (ПТК) «Виртуально-цифровая АЭС с ВВЭР» представляет собой совокупность интегрированных в общей среде расчетных кодов, обеспечивающих согласованное моделирование многообразных процессов, протекающих в системах и элементах АЭС с РУ технологии ВВЭР, функционирующую на высокопроизводительной вычислительной системе, рабочие места и видеостену из мониторов с высоким разрешением.





С помощью входящих в состав программно-технического комплекса расчетных кодов возможно построение моделей конкретных энергоблоков с РУ технологии ВВЭР для моделирования широкого спектра режимов работы энергоблока: нормальной эксплуатации, ее нарушений, включая тяжелые аварии. Программно-технический комплекс «Виртуально-цифровая АЭС с ВВЭР» способен решать широкий спектр задач, включая:

- инженерную поддержку Кризисного центра АО «Концерн Росэнергоатом» и формирование сценариев противоаварийных тренировок;
- верификацию проектных решений;
- расчетное обоснование безопасности;
- повышение операционной эффективности и другие.

Пилотная модель программно-технического комплекса разрабатывается для энергоблока № 1 НВАЭС-2.

Состав системы расчетных кодов ПТК «Виртуально-цифровая АЭС с ВВЭР»

Система кодов, входящих в состав программно-технического комплекса, позволяет моделировать следующие процессы:

- нейтронно-физические в активной зоне реакторной установки;
- теплогидравлические в оборудовании реакторного и турбинного отделений, в системе помещений защитной оболочки;
- распространения тепла в твэле;

Демонстрация ПТК «Виртуально-цифровая АЭС с ВВЭР» делегации во главе с Научным руководителем проектного направления «Прорыв» Адамовым Е. О., Советником генерального директора Госкорпорации «Росатом» Асмоловым В. Г. Докладчик к.ф.-м.н. Мосунова Н. А.

Программно-технический комплекс «Виртуально-цифровая АЭС с ВВЭР»



- наработки и выхода продуктов деления в газовый зазор твэла;
- термомеханические в топливе и оболочке твэла;
- распространения продуктов деления по первому контуру и в системе помещений защитной оболочки;
- разрушения активной зоны, поведения расплава на днище корпуса реактора и в устройстве локализации расплава;
- электромеханические в оборудовании электрической части энергоблока.

Моделируется также АСУ ТП нижнего уровня.

Все вышеуказанные процессы моделируются согласованно друг с другом. Кроме того, для моделирования нейтронно-физических, теплогидравлических и термомеханических процессов предусмотрена иерархия моделей — от инженерных подходов до углубленного моделирования:

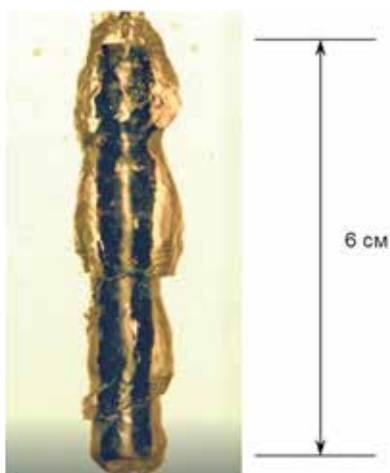
- по нейтронной физике: диффузионное приближение, метод Монте-Карло;
- по теплогидравлике: канальное приближение, ячейковое приближение, приближение пористого тела, CFD с RANS моделями турбулентности;
- по термомеханике: 1.5D приближение, 3D приближение на базе метода конечных элементов.

Методы углубленного моделирования (CFD с RANS моделями турбулентности, метод Монте-Карло, 3D приближение на базе метода конечных элементов) позволяют проводить верификацию проектных решений, выполнять оптимизацию конструкции, а также используются для настройки моделей инженерных методик.

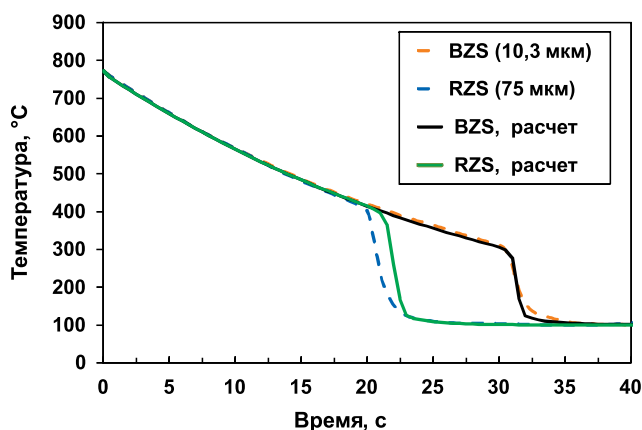
Следует отметить, что входящие в состав ПТК «Виртуально-цифровая АЭС с ВВЭР» расчетные коды могут использоваться не только в составе ПТК, но и как автономные программные продукты. Для этих целей каждый из модулей снабжен руководством пользователя и руководством по моделям, верификационным отчетом, графическим интерфейсом пользователя, позволяющим произвести подготовку данных для расчета и визуализировать результаты моделирования.

Особенности программной реализации компонентов ПТК «Виртуально-цифровая АЭС с ВВЭР»

Компоненты программно-технического комплекса «Виртуально-цифровая АЭС с ВВЭР» реализованы на основе методологии объектно-ориентированного программирования на языках C++ или FORTRAN. При этом обеспечена кросс-платформенность как всего ПТК, так и его отдельных компонентов по отношению к операционным системам семейств Windows и Linux. Реализовано распараллеливание компонентов на основе технологий OpenMP и MPI, позволяющих в полном объеме использовать возможности высокопроизводительной вычислительной системы, входящей в состав программно-технического комплекса. Разработка программ проводится с использованием системы коллективной разработки программного обеспечения SVN, кроме того, в проекте используются специальные процедуры контроля качества, такие как контроль исходных текстов на предмет соответствия шаблонам, автоматическое тестирование и другие.



а)



б)

Эксперимент POSTECH. Изучение пленочного кипения на поверхности вертикального стержня
а) Кадр скоростной видеосъемки эксперимента. Волны на поверхности раздела пар-вода;

б) Зависимость температуры поверхности стержня от времени. Сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными

Отдельные компоненты ПТК «Виртуально-цифровая АЭС с ВВЭР»

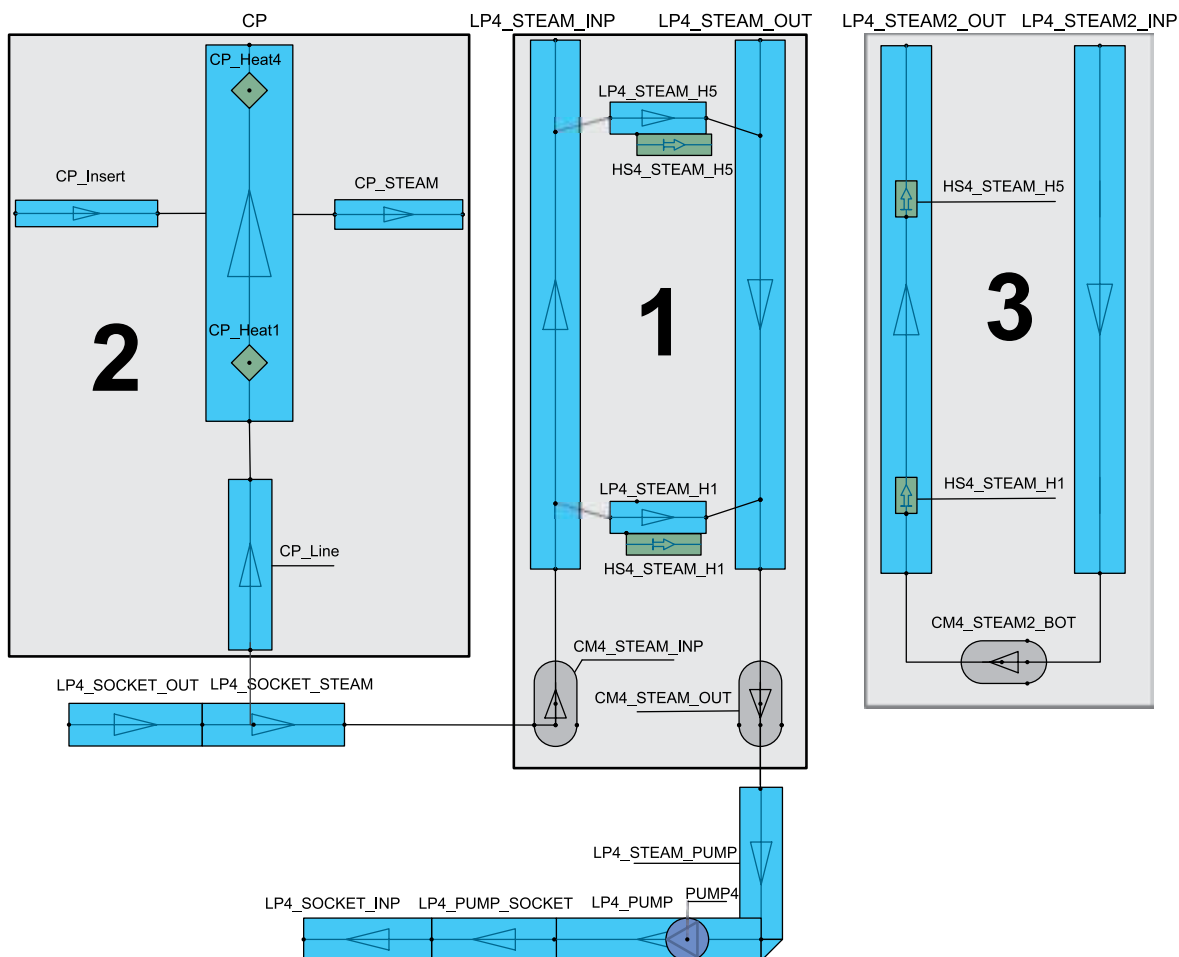
Теплогидравлические процессы в контурах
и помещениях защитной оболочки — модули
HYDRA-IBRAE/H2O, SCORE, SPOROUS

В состав программно-технического комплекса «Виртуально-цифровая АЭС с ВВЭР» входят несколько модулей, позволяющих описывать теплогидравлические процессы в а.з. и контурах циркуляции теплоносителя: каналный модуль HYDRA-IBRAE/H2O, ячейковый модуль SCORE и модуль пористого тела SPOROUS.

Модуль HYDRA-IBRAE/H2O основан на канальном приближении и относится к кодам улучшенной оценки, предназначенным для расчетного анализа нестационарных теплогидравлических процессов в контурах ядерных энерге-

тических установок с реакторными установками с водяным теплоносителем в режимах нормальной эксплуатации и при ее нарушениях. При разработке модуля использовались современные физические модели процессов, происходящих при эксплуатации реакторной установки. Модуль позволяет рассчитывать значения давления, поля скорости и температуры, а также другие теплогидравлические параметры во всех элементах реакторной установки за приемлемое расчетное время, что, несомненно, относится к его достоинствам.

Модуль верифицирован на широкой экспериментальной базе, включая эксперименты по отдельным явлениям (генерация/конденсация пара, гидравлические потери в каналах различной геометрии, критическое истечение теплоносителя при нарушении герметичности трубопроводов, кризис теплообмена в обогреваемых каналах, радиоллиз водяного теплоносителя, повторный залив и т.д.) и интегральные эксперименты, выполненные на стендах ИСБ-ВВЭР и ПСБ-ВВЭР.



1 – парогенератор,
2 – входящий и выходящий
трубопроводы в
парогенератор и
компенсатор давления,
3 – фрагмент второго
контура.

Графическая схема
четвертой петли
теплогидравлической схемы
первого контура
НВАЭС-2

Кроме того, выполнена верификация модуля в составе программно-технического комплекса на режиме с отключением двух ГЦН первого контура первого блока НВАЭС-2.

Существующие каналные коды не позволяют (в силу специфики заложенных моделей) учесть при моделировании межканальный обмен, а следовательно, и неоднородность распределения теплогидравлических параметров в поперечном направлении. Для компенсации этого недостатка в состав ПТК «Виртуально-цифровая АЭС с ВВЭР» включен расчетный модуль SCORE, основанный на ячейковом приближении, для моделирования основных теплогидравлических процессов, включая двухфазные, в пределах активной зоны реактора в режимах нормальной эксплуатации и при ее нарушениях. Модуль позволяет проводить детальное исследование процессов теплопереноса в сборках, рассчитывать поля давления, температуры теплоносителя как в продольном, так и поперечном относительно тепловыделяющей сборки направлениях. Достигается это, прежде всего, за счет того, что учитывается обмен массой, импульсом, энергией между соседними ячейками, то есть учитывается неоднородность в поперечном направлении.

Третий модуль (SPOROUS) — CFD модуль для расчета процессов теплогидродинамики в приближении пористого тела. Он позволяет описывать трехмерные процессы тепло- и массопереноса в активной зоне с использованием анизотропной модели пористого тела. Это позволяет заметно сократить время расчета на ЭВМ за счет существенного уменьшения числа элементов разбиения по сравнению с решением неусредненных по пространству уравнений гидродинамики. В результате работы модуля определяются как осредненные во времени, так и мгновенные значения следующих величин: скорость, давление, температура в пористом теле. К преимуществам модуля следует отнести и тот факт, что модуль обладает идеальной масштабируемостью и позволяет проводить вычисления с использованием MPI технологии на многопроцессорных ЭВМ.

Поведение твэла — модуль SFPR/C++

Твэльный модуль SFPR/C++, входящий в состав ПТК «Виртуально-цифровая АЭС с ВВЭР», предназначен для моделирования основных физических процессов, происходящих в твэле:

- **Переноса тепла.** Решается двумерное уравнение теплопроводности для топлива и оболочки твэла с учетом возможной многослойной структуры оболочки, как результата

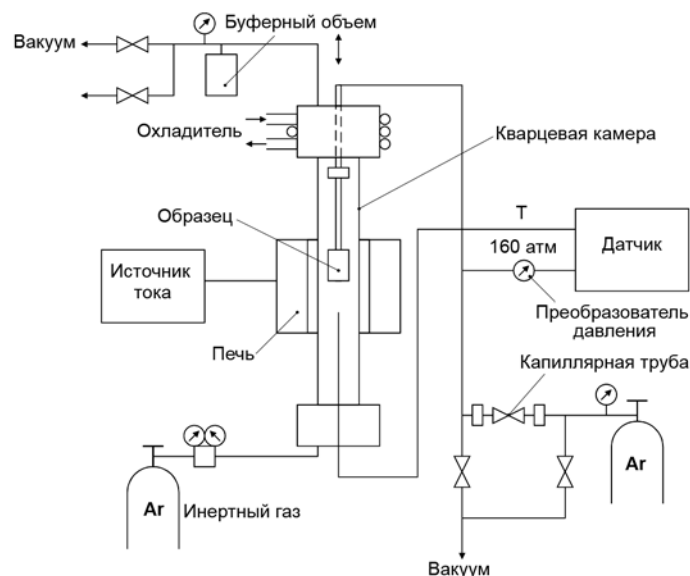
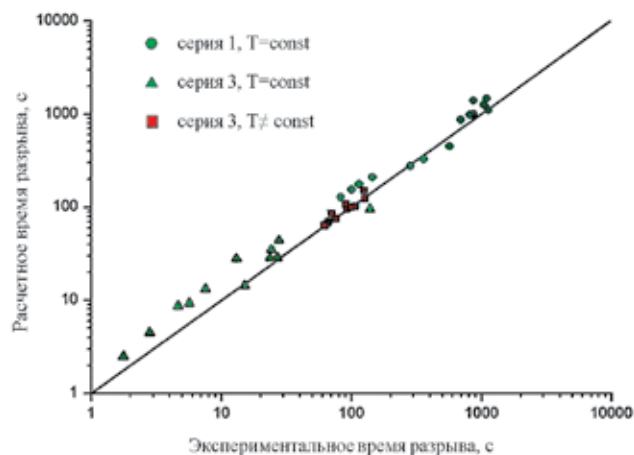


Схема экспериментальной установки проекта АЕК1 для исследования разрушения одиночных образцов



Сравнение экспериментальных и расчетных данных по времени до разрыва оболочек из сплава ЗП10 (серия 1 и 3)

окисления циркониевого сплава.

- **Окисление и гидрирование оболочки твэла.** Моделируется динамика роста слоев циркониевой оболочки в условиях высокотемпературного окисления. Для этого решаются диффузионные уравнения для концентрации кислорода в различных фазах циркониевого сплава. Граничные концентрации кислорода на межфазных границах могут быть как равновесными, так и неравновесными. Также модуль описывает окисление-растворение, то есть кинетику взаимодействий в системе: твердое топливо UO_2 — жидкая смесь (U-Zr-O) — твердый оксид ZrO_2 — пар.



Группа разработчиков ПТК
«Виртуально-цифровая АЭС
с ВВЭР» из ИБРАЭ РАН
и АО «ВНИИАЭС»

- **Деформирование и разрушение оболочки твэла** с учетом изменения механических свойств материала оболочки вследствие окисления и выхода газообразных продуктов деления, приводящих к росту газового давления. Рассматриваются три вида разрушения оболочки: разрыв оболочки внутренним давлением, разрушение вследствие термического удара и разрушение внешнего оксидного слоя расплавом материала оболочки.
- **Процессы, протекающие в топливе**, включая наработку продуктов деления, их перенос внутри топлива и выход в открытую пористость, химические взаимодействия продуктов деления внутри топливных зерен и другие.

В составе ПТК «Виртуально-цифровая АЭС с ВВЭР» организовано взаимодействие твэльного расчетного модуля с теплогидравлическим и нейтронно-физическим расчетными модулями. Одним из главных достоинств твэльного расчетного модуля SFPR/C++ является использование современных физических моделей для описания поведения топлива в режимах нормальной эксплуатации АЭС и при нарушениях нормальной эксплуатации.

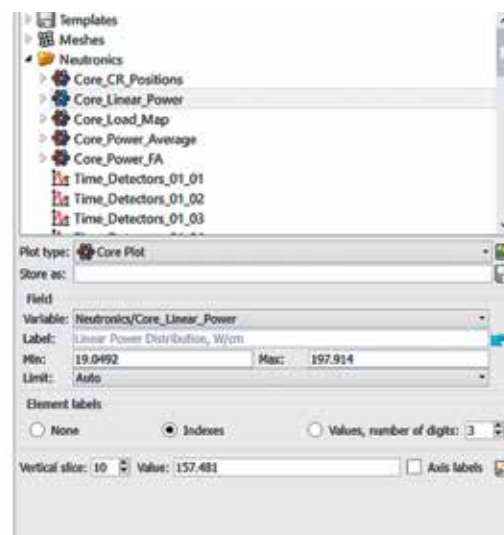
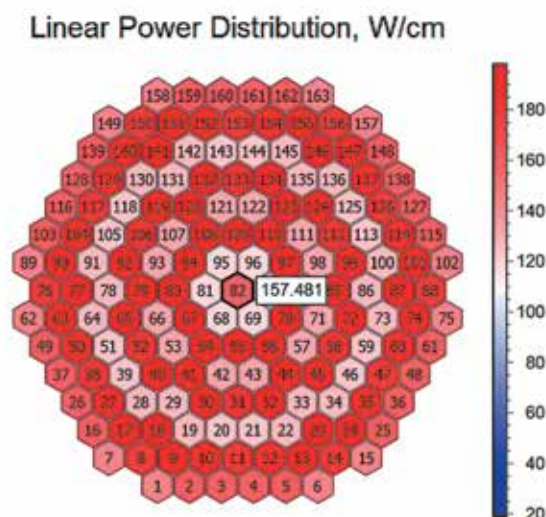
Твэльный модуль верифицирован на широкой базе экспериментов, посвященных исследованию отдельных явлений, и интегральных экспериментов.

Нейтронно-физические процессы — модуль NEUTRON_3D

Модуль NEUTRON_3D позволяет проводить 3D расчеты нейтронно-физических характеристик а.з. реакторов водо-водяного типа с ТВС гексагональной геометрии в стационарных, квазистационарных (при моделировании топливной кампании) и переходных режимах, включая аварийные. Моделирование осуществляется с использованием диффузионного приближения.

Модуль позволяет моделировать следующие процессы и явления, важные для расчетного обоснования РУ технологии ВВЭР:

- пространственное распределение потока нейтронов, включая запаздывающие нейтроны, по объему расчетного объекта;
- пространственное распределение энерговыделения по объему активной зоны;
- реактивность реактора, эффекты реактивности по температуре топлива, плотности и температуре теплоносителя в первом контуре;
- эффективность РО СУЗ;
- эффективность борного регулирования;
- пространственные эффекты, возникающие при движении РО СУЗ и сбросе аварийной защиты;
- отравление ксеноном и самарием;
- пространственное распределение остаточного энерговыделения в активной зоне.



К преимуществам модуля NEUTRON_3D следует отнести его быстродействие и точность расчета, что обеспечивается следующими его характеристиками:

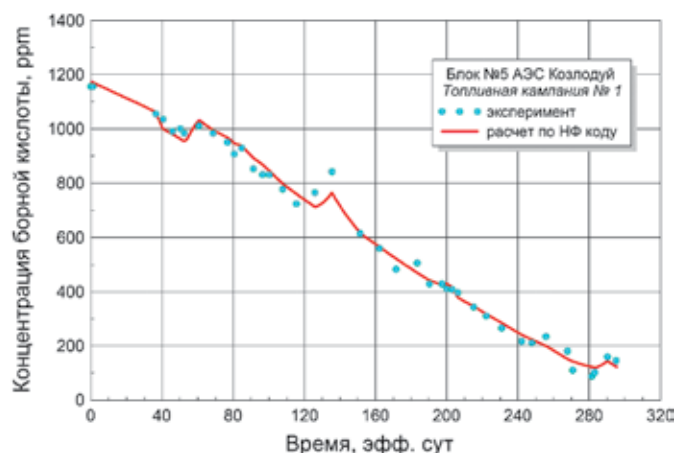
- использование современных апробированных методов решения систем линейных алгебраических уравнений: метод подпространства Крылова, стабилизированный метод бисопряженных градиентов Bi-CGStab, процедура предобуславливания систем линейных алгебраических уравнений (неполная LU-факторизация);
- использование нодального метода TPEN, позволяющего существенно повысить точность при расчете на грубой сетке;
- использование динамической аллокации памяти;
- параллелизация модуля на основе технологии параллельного программирования для систем с общей памятью OpenMP.

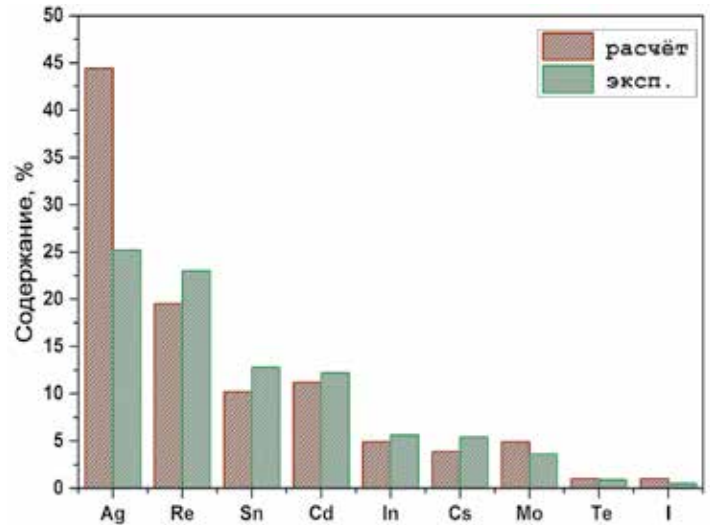
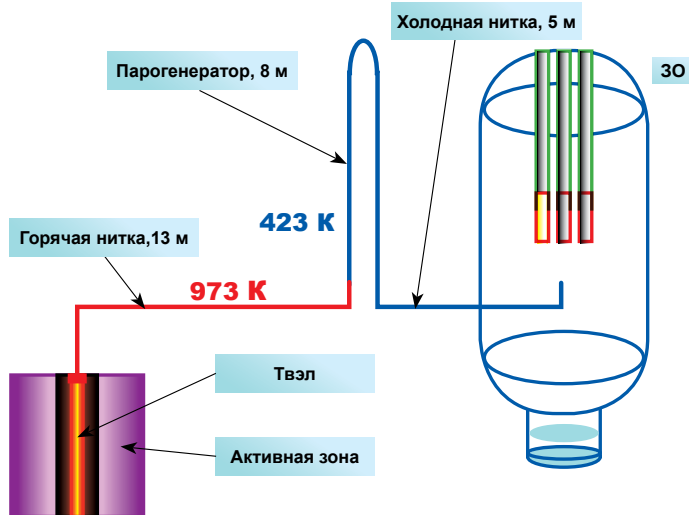
Картограмма линейной мощности ТВС на 10-м слое по высоте в момент времени $t = 344$ с

Проведена верификация модуля NEUTRON_3D для расчета стационарных и динамических режимов с использованием математических бенчмарк-тестов и экспериментальных данных, полученных на первом блоке НВАЭС-2, блоке №3 Калининской АЭС и блоке №3 Ростовской АЭС. Расчеты бенчмарк-задач AER-2 и AER-3 проведены совместно с термомеханическим и теплогидравлическим расчетными модулями.

Зависимость концентрации борной кислоты в ходе топливной кампании

При верификации модуля NEUTRON_3D для моделирования топливной кампании ВВЭР использовались экспериментальные данные по кампаниям пятого блока АЭС «Козлодуй» (Болгария), первого блока Ростовской (Волгодонской) АЭС, первого блока НВАЭС-2, а также международный бенчмарк для шестого блока АЭС «Козлодуй» (Болгария). В ходе верификации проводилось сравнение результатов расчета нескольких кампаний реактора ВВЭР-1000 с результатами расчетов по другим программам, в том числе аттестованным. На рисунках приведены демонстрация работы нейтронно-физического модуля в составе программно-технического комплекса на примере переходного режима с частичным изменением нагрузки с 75% до 50% в РУ первого блока





НВАЭС-2 и пример расчета первой топливной кампании шестого блока АЭС «Козлодуй» (международный бенчмарк-тест, использующий экспериментальные данные).

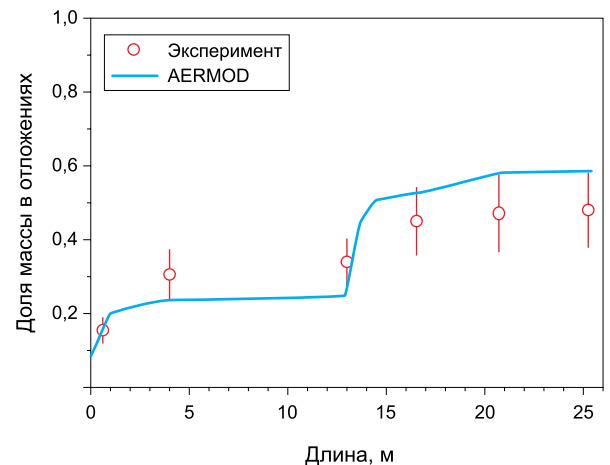
Поведение продуктов деления в первом контуре и помещениях защитной оболочки — модуль AERMOD

Аэрозольный модуль поведения продуктов деления и радиоактивных аэрозолей включает в себя моделирование всех основных физико-химических процессов образования и динамики полидисперсных многокомпонентных аэрозолей в первом контуре реакторной установки и защитной оболочке АЭС, включая химию продуктов деления и аэрозолей в парогазовой среде теплоносителя и атмосфере защитной оболочки. Реализованная в модуле модель основана на использовании метода фракций для размера аэрозольных частиц (массы или объема) в предположении постоянной фазовой плотности. Она позволяет моделировать поведение полидисперсных многокомпонентных аэрозольных частиц в газопаровой среде с учетом основных процессов динамики аэрозолей в кинетическом приближении, включая нуклеацию и конденсацию смеси различных паров продуктов деления, конструкционных материалов и компонентов ядерного топлива, коагуляцию и осаждение аэрозолей на поверхность, конденсацию различных паров на поверхность, формирование многокомпонентного слоя отложений, физико-химические превращения и радиоллиз под действием радиационного излучения в жидкой и газовой фазе.

К основным преимуществам модуля относятся возможность моделирования полидисперсного распределения аэрозолей с использованием любого количества фракций в диапазоне размера частиц от нанометра до десятка микрон, многокомпонентного состава частиц, включая наличие гигроскопических компонентов, радиационной активности взвешенных радионуклидов и аэрозолей, многокомпонентного состава отложений на поверхности, что обеспечивает возможность достоверного расчета дозы радиационного облучения в помещениях защитной

Схема интегральной установки PHEBUS (Франция) и состав аэрозолей в источнике выхода продуктов деления в защитную оболочку для эксперимента PHEBUS-FPTI (расчет с использованием модуля AERMOD)

Расчетная (с использованием модуля AERMOD) эффективность осаждения цезия по длине установки в сравнении с данными измерений для эксперимента PHEBUS-FPTI



оболочки АЭС и оценку остаточного выделения тепла вследствие осаждения радионуклидов на поверхность.

Модель радиолитиза и неравновесной химии включает неравновесную радиационную химию продуктов деления в газовой фазе, в особенности образование летучих соединений йода и химию йода в системе озон-йод. Учитываются радиолитиз воды и жидкофазная химия йода с возможностью моделирования выхода летучих соединений йода в атмосферу помещений защитной оболочки. Механизм радиолитиза паров воды и основных компонентов воздуха рассматривается в системе элементов H-O-I и I₂-O₃. В модели учтена возможность образования новых частиц вследствие нуклеации радиоактивных компонентов, отличных по составу от характерных аэрозольобразующих продуктов деления в первом контуре, в частности, образование мельчайших частиц оксидов йода.

Модуль верифицирован на экспериментах в каналах и термоградиентных трубах для отдельных явлений (установки STORM, AHMED, CHIP) и интегральных экспериментах на установках, моделирующих комплексное поведение смеси паров и аэрозолей продуктов деления в первом контуре реакторной установки для условий аварийной разгерметизации теплоделяющих элементов и выхода накопленных продуктов деления в поток теплоносителя и далее в помещения защитной оболочки (FALCON, PHEBUS). На предыдущей странице представлены схема экспериментальной установки, а также, в качестве примера, — результаты расчета состава аэрозолей в источнике выхода продуктов деления в защитную оболочку и активности цезия в отложениях на поверхности горячей нитки парогенератора для эксперимента PHEBUS-FPT1.

Модуль для анализа поведения расплава на днище корпуса реактора и в устройстве локализации расплава — модуль HEFEST-VAES

Модуль HEFEST-VAES предназначен для количественного описания взаимодействия расплава с конструкциями напорной камеры реактора (НКР) на внутрикорпусной стадии тяжелой аварии и с устройством локализации расплава (УЛР). В модуле реализовано решение двумерного нестационарного нелинейного уравнения теплопроводности, коэффициенты которого рассчитываются исходя из физических моделей, описывающих такие процессы, как:

- поэтапное поступление расплава в НКР, его тепловое взаимодействие с водой;
- образование расплава, его расслоение на фазы;

- распространение границы плавления, проплавление и выход расплава из корпуса;
- изменение конфигурации материала в НКР и УЛР в процессе плавления;
- граничное тепловое взаимодействие: с теплоносителем и со стенками полости, включая моделирование тепловой эрозии стен (защиты в УЛР);
- химическое взаимодействие в УЛР.

К преимуществам модуля следует отнести:

- наличие автоматизированных процедур моделирования изменения конфигурации расплава, включая перемещение границ материалов расплав/конструкция, что позволяет достаточно реалистично моделировать нестационарное плавление;
- возможность использования высокого сеточного разрешения, что важно для корректного предсказания границ плавления корпуса, в том числе, в УЛР;
- высокое быстродействие даже на мелких сетках — быстрее или существенно быстрее реального времени.

Модуль верифицирован на 20 аналитических тестах, включая задачи нестационарные, нелинейные, двумерные, с разрывными коэффициентами, представляющие основной круг отдельных явлений теплопереноса в расплаве и конструкциях при аварии, а также на ряде отдельных и интегральных экспериментов проектов RASPLAV-MASCA. Ниже на рисунках приведена демонстрация работы данного модуля в составе программно-технического комплекса на примере моделирования поздней стадии аварии Ду850 первого блока НВАЭС-2.

Модуль для анализа разрушения активной зоны — модуль HEFEST-CORE

Модуль HEFEST_CORE предназначен для количественного описания поздней стадии тяжелой аварии — от начала массового плавления оболочек ТВЭЛов до перемещения расплава в НКР. Методика расчета основана на физических моделях модуля HEFEST-VAES: модели двухфазной гетерогенной среды, описывающей сосуществующие в активной зоне твердую фазу и расплав, и конечно-элементных технологиях численного описания этой среды в рамках физических допущений о процессе разрушения активной зоны при тяжелой аварии.

Описывается поведение расплавленных оболочек и расплавленного или твердого топлива, состав расплава

(в интерфейсе с модулем SFPR), рассчитываются эволюция температуры, состояние активной зоны, граничное взаимодействие расплава (с выгородкой, БЗТ, дистанционирующими решетками ТВС), выход расплава в НКР (в интерфейсе с модулем HEFEST-VAES).

Основные преимущества модуля HEFEST_CORE состоят в:

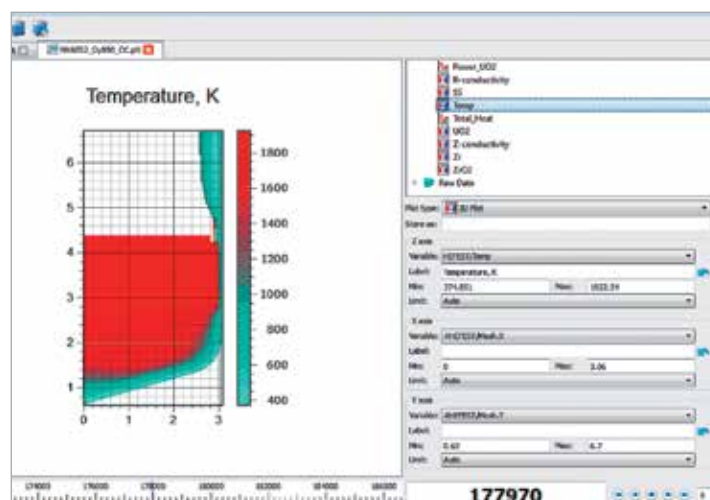
- использовании двумерного подхода для моделирования процесса разрушения активной зоны, что позволяет описывать ключевые процессы формирования бассейна расплава и его взаимодействия с границами;
- отказе от громоздких и некорректных при больших временах моделей типа *candling*, пригодных только для моделирования отдельных твэлов при малой степени плавления;
- естественном интерфейсе с моделями расчета НКР, описывающими следующие стадии аварии;
- быстрой скорости расчетов при сохранении высокого пространственного разрешения (существенно быстрее реального времени).

Текущее состояние разработки и планы дальнейшего развития Программно-технического комплекса «Виртуально-цифровая АЭС с ВВЭР»

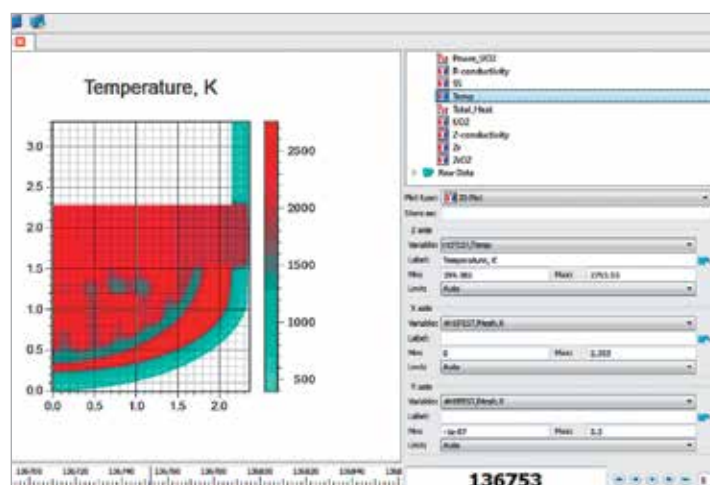
В 2017 году завершена разработка основных расчетных кодов, формирующих ядро программно-технического комплекса. В 2018 году будет завершена разработка последнего из модулей — модуля разрушения активной зоны. Кроме того, в 2018 г. должны быть завершены работы по интеграции отдельных программных модулей в состав программно-технического комплекса.

К концу 2018 года будут полностью завершены работы по монтажу и наладке технических средств. В конце 2019 г., после завершения работ по верификации программно-технического комплекса и его опытной эксплуатации, будут проведены приемо-сдаточные работы.

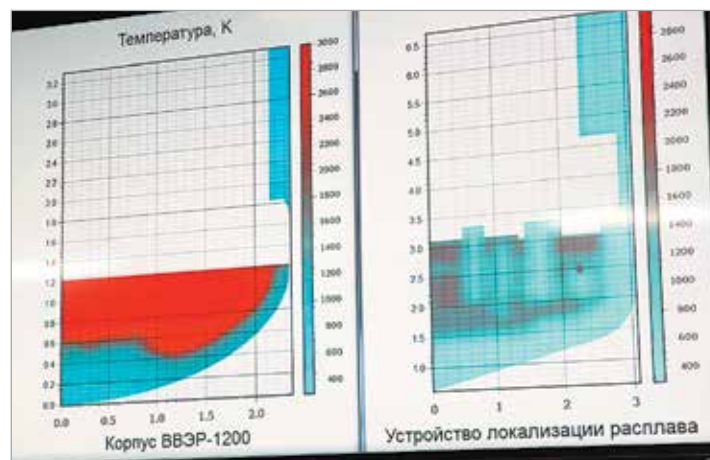
В дальнейшем планируется поэтапное внедрение программно-технического комплекса «Виртуально-цифровая АЭС с ВВЭР» в деятельность Кризисного центра АО «Концерн Росэнергоатом», а также его тиражирование на энергоблоки других типов.



Расчет УЛР (распределение квазистационарной температуры)



Расчет внутрикорпусной стадии (распределение температуры перед проплавлением корпуса реактора)



Результаты моделирования процессов на мониторах
ПТК «Виртуально-цифровая АЭС с ВВЭР»

ПРОБЛЕМНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЕ РАСЧЕТНЫЕ КОДЫ

Развитие и применение кодов по анализу безопасности АЭС

Прием корейской делегации во главе с президентом Корейского института по безопасности атомной энергии Ким Му Вон. Заместитель директора ИБРАЭ РАН по разработке интегрированных программных комплексов анализа безопасности АЭС и ЯТЦ Стрижов В. Ф. рассказывает о компьютерных кодах для анализа безопасности ядерных энергетических установок и моделирования тяжелых аварий

Накопленный в ИБРАЭ РАН многолетний опыт создания и применения программных средств анализа безопасности объектов атомной энергетики позволил сформулировать методологический подход к их разработке, который включает в себя следующие основные направления:

- разработка моделей, основанных на уравнениях математической физики и современных знаниях о процессах и явлениях, происходящих в различных режимах работы реакторных установок;
- создание на основе этих моделей компьютерных программ для анализа аварийных процессов на АЭС и их верификация;
- расчетно-теоретические работы по сопровождению экспериментальных программ;
- применение разработанных программных комплексов для анализа безопасности атомных электростанций.



Использование физических подходов к построению моделей позволяет значительно улучшить их предсказательную способность и уменьшить неопределенность расчетов. Эффективность программных средств проверяется путем их верификации с использованием экспериментальных данных. Одновременно проводится оценка существующей базы знаний по физическим процессам и явлениям, что позволяет более четко формулировать задачи экспериментальных исследований.

Программные коды разрабатываются в ИБРАЭ РАН в рамках совместных проектов с российскими и международными организациями, действующими в сфере обеспечения безопасности атомной энергетики. Особую роль играет участие ИБРАЭ РАН в интегральных экспериментах, позволяющих верифицировать интегральные коды.

В ходе разработки моделей и кодов для анализа тяжелых аварий были выявлены основные неопределенности используемых физических моделей, получены оценки применимости существующих кодов к анализу безопасности АЭС с реакторами различных типов. Дальнейшее развитие этих кодов происходит по пути создания интегральных программных комплексов. Например, пакет программ РАТЕГ-СВЕЧА-ГЕФЕСТ, разрабатывавшийся в рамках проекта обоснования водородной безопасности и устройств удержания расплава реакторов ВВЭР, вошел в состав интегрального расчетного комплекса СОКРАТ.

Расчетный код CONT для анализа безопасности защитных оболочек АЭС

Разработанный в ИБРАЭ РАН и прошедший аттестацию программный комплекс (ПК) CONT предназначен для численного моделирования напряженно-деформированного состояния (НДС) защитных оболочек АЭС при статических эксплуатационных и аварийных нагрузках, в том числе и температурных, с возможностью поэтапного расчета и учета повторяемости геометрии отдельных фрагментов конструкций.

ПК CONT обеспечивает проведение линейно-упругих и нелинейных расчетов защитных оболочек (ЗО) различных типов: железобетонных без предварительного напряжения, железобетонных предварительно-напряженных, стальных. Для каждого типа ЗО строится расчетная модель, которая учитывает особенности геометрических параметров оболочки, ее армирование, физико-механические характеристики используемых материалов, расположение напрягаемых арматурных канатов.

В рамках верификации ПК CONT проведены расчеты НДС моделей защитных оболочек, построенных в США в национальной лаборатории Sandia (железобетонной без преднапряжения в масштабе 1/6 и железобетонной предварительно напряженной в масштабе 1/4, которая является аналогом защитной оболочки одной из японских АЭС с реактором PWR). Для этого были разработаны осесимметричная и трехмерная конечно-элементная модели, а также методика расчета преднапряженной железобетонной ЗО, учитывающая действие нагрузки от натяжения арматурных канатов, от собственного веса конструкции и от внутреннего давления.



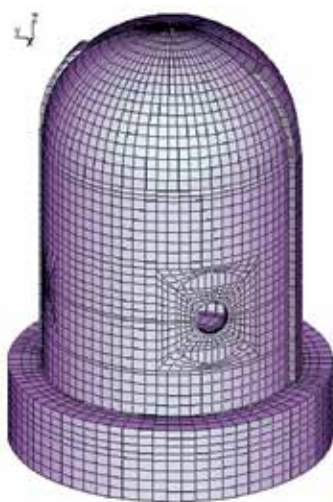
Медведев Виктор Николаевич

к.т.н., и.о. зав. лабораторией механики строительных конструкций

«Защитная оболочка, или контеймент, АЭС является сложной пространственной конструкцией. Учет ее особенностей требует комплексного подхода к определению напряженно-деформированного состояния (НДС) ЗО при проектных и запроектных авариях. Большое влияние на характер распределения напряжений в стенке ЗО оказывают температурные напряжения, обусловленные колебанием температур внутри и снаружи контеймента. В ИБРАЭ РАН разработаны методики, математические модели и программные модули, обеспечивающие выполнение расчетов НДС ЗО как в осесимметричной, так и в объемной постановке задачи с учетом наличия армированных слоев бетона и внутренней стальной облицовки, а также образования трещин в бетоне».



а)



б)

Модели железобетонной предварительно напряженной защитной оболочки SANDIA в масштабе 1/4: а) реальная; б) трехмерная компьютерная, разработанная в рамках верификации кода CONT

Преднапряжение защитной оболочки энергоблока № 3 Ростовской АЭС



Результаты расчетов уровней давления, приводящих к появлению первой трещины в бетоне в зависимости от типа напряжений, показали хорошее соответствие данным натурных измерений и подтвердили применимость ПК CONT для решения практических задач по анализу напряженно-деформированного состояния ЗО при воздействии эксплуатационных и аварийных нагрузок.

В рамках проведения работ в интересах концерна «Росэнергоатом» в ИБРАЭ РАН изучена и обоснована возможность создания экспертной системы оценки фактического состояния защитной оболочки АЭС с ВВЭР-1000 на основе программы расчета НДС конструкции и данных датчиков контрольно-измерительной аппаратуры (КИА). Определены основные факторы, влияющие на показания датчиков КИА, разработаны способы оценки их работоспособности при длительной эксплуатации.

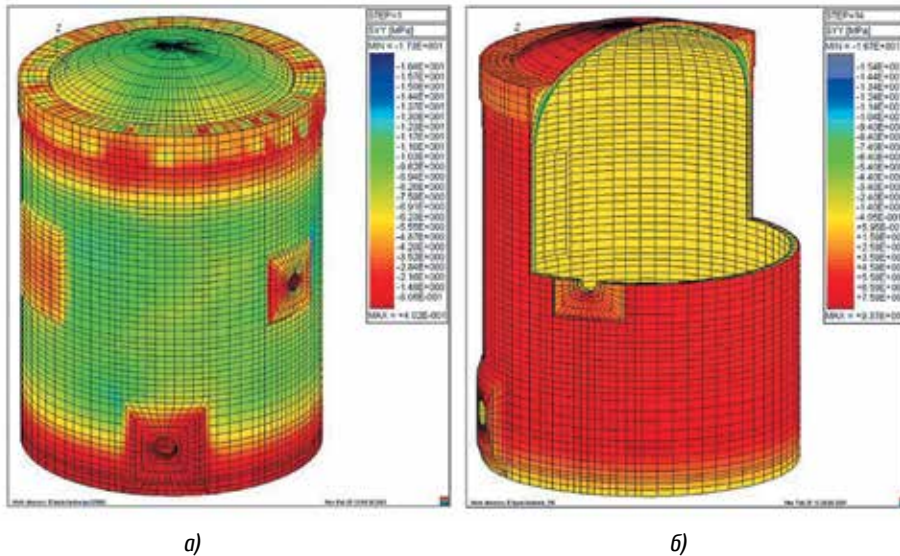
Комплекс работ по обоснованию эксплуатационной пригодности защитной оболочки энергоблоков №№ 3, 4 Ростовской АЭС

Для своевременного ввода в эксплуатацию энергоблоков №№ 3, 4 Ростовской АЭС был выполнен комплекс работ по обоснованию эксплуатационной пригодности защитной оболочки, включая:

- выполнение работ по мониторингу защитной оболочки в период ее возведения, преднапряжения и приемо-сдаточных испытаний;
- выполнение работ по натурным наблюдениям защитной оболочки в период преднапряжения и приемо-сдаточных испытаний;
- адаптация экспертной системы оценки напряженно-деформированного состояния защитных оболочек блоков АЭС с ВВЭР к энергоблокам №№ 3, 4 Ростовской АЭС.

Впервые в практике строительства АЭС ИБРАЭ РАН совместно с Волгодонским инженерно-техническим институтом — филиалом НИЯУ МИФИ были выполнены работы по мониторингу защитной оболочки энергоблоков №№ 3, 4 Ростовской АЭС, включая:

- формирование базы данных о техническом состоянии защитной оболочки;



Распределение окружных напряжений в бетоне защитной оболочки АЭС ВВЭР-1000 от действия:

- а) преднапряжения;
- б) неравномерного поля температуры

455 — общее количество реакторных установок с водяным теплоносителем, находящихся в эксплуатации в мире

- разработка и согласование программы обследования и Рабочей программы контроля строительных конструкций защитной оболочки по состоянию на текущий период строительства;
- проведение и анализ визуально-измерительного и инструментального контроля элементов строительных конструкций защитной оболочки энергоблоков №№ 3, 4 Ростовской АЭС;
- разработка информационной системы мониторинга защитной оболочки АЭС;
- выполнение и анализ работ по мониторингу защитной оболочки;
- подготовка исходной информации для разработки Технического паспорта защитной оболочки энергоблоков №№ 3, 4 Ростовской АЭС.

ИБРАЭ РАН было сделано предложение по изменению технологии натяжения армоканатов системы преднапряжения защитной оболочки энергоблоков №№ 3, 4 Ростовской АЭС. Усовершенствованная технология натяжения армоканатов позволила обеспечить проектный уровень преднапряжения защитной оболочки. Получен патент на изобретение «Способ натяжения арматурных канатов» RUS 2548267 22.01.2014.

Результаты работ по мониторингу и натурным наблюдениям защитной оболочки энергоблоков №№ 3, 4 Ростовской АЭС в период ее возведения, преднапряжения и приемо-сдаточных испытаний показали, что техническое состояние, установленное на основе результатов обследования, контроля строительных конструкций защитной оболочки и расчетов напряженно-деформированного состояния, удовлетворяет требованиям проектной и нормативной документации.

Возможности продления срока службы защитных оболочек АЭС с ВВЭР-1000

Проектный срок службы защитных оболочек АЭС первого поколения (5-й энергоблок Нововоронежской АЭС, 1-й и 2-й энергоблок Калининской АЭС для реакторов ВВЭР-1000) завершается, поэтому актуальной является разработка методик продления ресурса этих 30.

Патент на изобретение «Способ натяжения арматурных канатов»
RUS 2548267 22.01.2014



Анализ НДС защитных оболочек АЭС, выполненный применительно ко 2-му энергоблоку Калининской АЭС с использованием программного комплекса CONT, показал, что в течение всего периода эксплуатации имеют место значительные деформации ползучести бетона, которые приводят к появлению внутренних напряжений в стенке 30 и обусловлены как влиянием сезонных и суточных колебаний температур окружающей среды, так и неоднородностью физико-механических характеристик уложенного в тело оболочки бетона.

Для выполнения расчетов НДС защитной оболочки АЭС была разработана ее трехмерная модель, учитывающая основные конструктивные элементы 30: внутреннюю герметизирующую облицовку, стержневую арматуру и напрягаемые арматурные канаты.

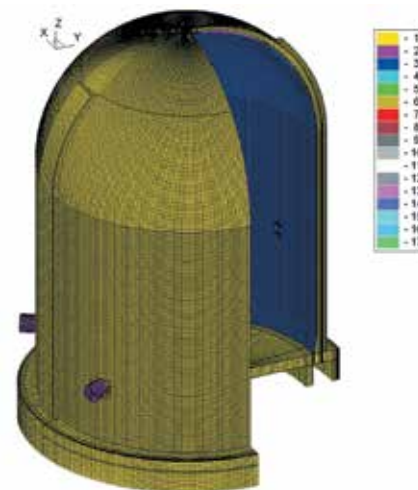
Результаты расчетов позволили сделать вывод о том, что для повышения эксплуатационной надежности защитной оболочки реакторного отделения АЭС ВВЭР-1000 необходимо снизить усилие натяжения арматурных канатов до 750 т. Это позволяет значительно сократить объемы контрольно-профилактических работ на системе предварительного напряжения 30, уменьшить потери от релаксации напряжений в проволоках арматурного каната, а также избежать самопроизвольных обрывов арматурных канатов в процессе нормальной эксплуатации АЭС.

Анализ защитных оболочек АЭС нового поколения

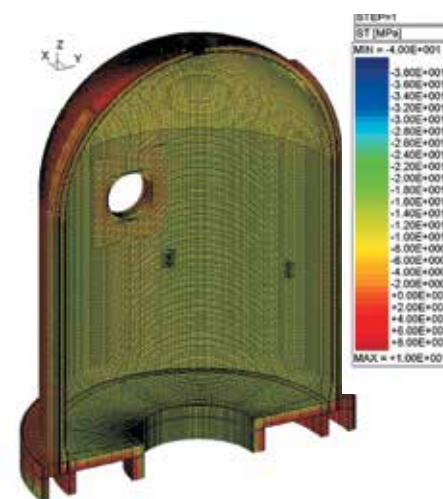
Одним из основных элементов обеспечения повышенной надежности российских АЭС нового поколения (АЭС-2006) является двойная защитная оболочка, состоящая из герметичной предварительно напряженной 30 и наружной ненапряженной железобетонной оболочки.

В ИБРАЭ РАН с использованием кода CONT проведен комплексный анализ поведения защитной оболочки АЭС 2006 при воздействии различных факторов, имеющих место в штатных и аварийных режимах работы АЭС. Трехмерная модель 30, включающая все ее основные конструктивные элементы, содержит 1262080 объемных 8-ми узловых конечных элементов, моделирующих бетон, и 320224 стержневых элементов, моделирующих меридиональную и окружную арматуру вблизи внутренней и наружной поверхности оболочки.

Расчеты НДС 30 были выполнены для случая воздействия комбинации нагрузок (влияния собственного веса конструкции, преднапряжения, внутреннего давления и температурных градиентов) в начальный момент аварии. В результате расчетов были определены зоны наибольшей концентрации напряжений 30 АЭС-2006 при аварийных нагрузках, для которых необходимо вести повышенный контроль НДС в течение всего жизненного цикла, включая период возведения, преднапряжения, приемо-сдаточных испытаний и длительной эксплуатации.



Модель защитной оболочки АЭС-2006 с удаленным для наглядности фрагментом



Распределение кольцевых напряжений в бетоне от воздействия суммарной нагрузки в защитной оболочке АЭС-2006 в момент начала аварии

Пакет программ CONV

Для анализа поведения расплава в устройстве локализации расплава реактора ВВЭР-1000 рассмотрены вопросы заполнения ловушки с учетом геометрических особенностей размещения жертвенного материала. Разработанная трехмерная компьютерная модель ловушки также включает в себя описание физико-химических взаимодействий расплава кориума и конструкционных материалов активной зоны с жертвенными материалами и с бетоном. Теплогидродинамическая модель CONV-3D создана на основе разработанной в ИБРАЭ РАН методики 3D-моделирования гидродинамических течений с применением терафлопсных суперкомпьютеров — «Чебышев», «Ломоносов», «Blue Gene» (МГУ), «К-100» (ИПМ РАН). Ее уникальность состоит в возможности проведения расчетов на кластерных ЭВМ с большими массивами данных и размерностями расчетных сеток (до 1 млрд узлов), в достижении масштабируемости и получении результатов в разумное время (несколько часов или дней).

Код CONV-3D верифицирован на серии экспериментальных тестов, среди которых: слепой тест по моделированию течений в Т-соединении (OECD/NEA, эксперименты проекта RASPLAV), эксперимент SIBIRIA (Новосибирск, ИТ СО РАН) по анализу потока в кольцевом канале с барьером. Верификация теплогидродинамической модели CONV-3D проводилась на данных по тепловому перемешиванию и конвекции, полученных на установке MAX (ANL США), а в эксперименте ERCOFTAC (тест из мировой базы данных по турбулентным течениям) — по естественной конвекции в замкнутых областях при экстремально высоких числах Рэлея. Во всех случаях достигнуто хорошее совпадение результатов численного моделирования с экспериментальными данными, что говорит о возможности применения модели CONV-3D для предсказания гидродинамических течений в нормальных и аварийных режимах работы проектируемых и действующих АЭС. В настоящее время CONV-3D используется в расчетах эталонного теста Matis-H (OECD/NEA) по анализу турбулентного перемешивания в горизонтальных подканалах связки стержней при нормальных давлении и температуре.

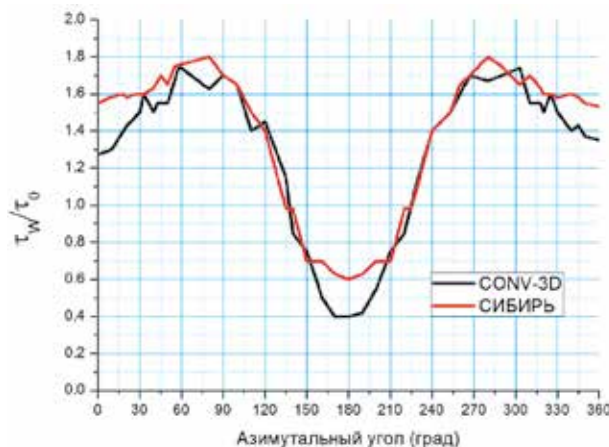
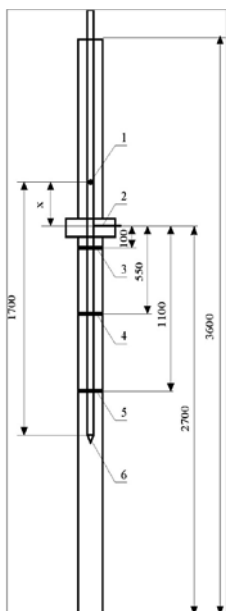


Чуданов Владимир Васильевич

к.ф.-м.н., и.о. зав. лабораторией
вычислительной теплогидродинамики

«В рамках реализации задач численного моделирования процессов теплопереноса при анализе тяжелых аварий на АЭС в ИБРАЭ РАН созданы двумерные и трехмерные гидродинамические коды CONV-2D и CONV-3D, которые верифицированы на широкой базе экспериментальных данных по ламинарным и турбулентным течениям расплава.

Разработаны модели формирования твердых структур на охлаждаемых границах расплава с учетом реальных фазовых диаграмм состояний, проведены численные расчеты по моделированию крупномасштабных экспериментов в проекте RASPLAV и расчеты конвекции тепловыделяющего стратифицированного расплава в геометрии реактора ВВЭР-440».



Экспериментальная установка СИБИРЬ (ИТ СО РАН) и результаты численных расчетов по коду CONV-3D. Усредненные по времени сдвиговые напряжения на стенке в зависимости от азимутальной координаты. $X=120\text{ мм}$

Топливный код нового поколения SFPR

Для моделирования термомеханических и физико-химических процессов на уровне твэла — основного элемента энергетического реактора, — используются топливные коды. В отличие от интегральных кодов, их применение не требует сложных расчетов поведения активной зоны реактора, что позволяет сфокусировать внимание на детальном описании функционирования отдельных твэлов в различных режимах работы РУ. Однако физические модели, используемые в существующих топливных кодах, упрощены и содержат целый ряд подгоночных параметров и эмпирических корреляций, что значительно снижает предсказательные возможности этих кодов и их применимость для описания новых видов топлива. Поэтому решение многих практических задач в сфере обеспечения безопасности ЯЭУ требует создания топливных кодов нового поколения, свободных от указанных недостатков.

В настоящее время в ИБРАЭ РАН завершается разработка топливного кода нового поколения SFPR, который предназначен для детального описания и прогнозирования термомеханического и физико-химического поведения топливных элементов при нормальных условиях эксплуатации, при нарушении нормальных условий эксплуатации и при проектных и запроектных авариях водо-водяных реакторов.

Повышенная предсказательная способность применяемых в топливном коде SFPR вычислительных алгоритмов обусловлена тем, что в его основе лежат физические модели, изначально разработанные для описания тяжелых аварий на АЭС и характеризующиеся высокой степенью детализации сложных процессов, протекающих в топливе (многие из этих моделей используются также в интегральном расчетном комплексе СОКРАТ). Впоследствии эти модели были расширены в область проектных аварий и нормальной эксплуатации топлива, сохранив, однако, возможность детального описания взаимосвязанных физических процессов в твэлах.

Механистический подход, основанный на применении в коде SFPR усовершенствованных физических моделей, позволяет адекватно моделировать маломасштабные тесты и эксперименты, проводимые в рамках реакторных испытаний различных видов топлива (МОКС, нитридного, карбидного, металлического), а также использовать результаты моделирования при анализе поведения твэлов в течение топливной кампании или же в условиях проектных и запроектных аварий, в том числе и для реакторов на быстрых нейтронах.

Возможности современных компьютерных систем позволяют отказаться от применения полуэмпирических моделей микроструктурного анализа топлива с большим количеством неявных параметров, и перейти к гораздо более эффективному способу непосредственных расчетно-теоретических (*ab initio*) вычислений этих параметров, исходя из основных принципов квантовой механики и молекулярной динамики. Поэтому в ИБРАЭ РАН особое внимание уделяется созданию физических моделей *ab initio* и использованию их в топливных кодах нового поколения (в том числе, SFPR) с целью выполнения поддерживающих расчетов, особенно в применении к новым видам топлива, для которых еще не наработана достаточно подробная экспериментальная база данных. Аналогичным образом, для выполнения поддерживающих расчетов при определении ключевых параметров моделей, составляющих основу термомеханического и нейтронно-физического модулей топливного кода, могут быть применены наиболее эффективные расчетные методики (в частности, метод конечных элементов).

Конечным результатом разработки и модификации (в применении к новым видам топлива для реакторов на быстрых нейтронах) указанных физических моделей является обеспечение, в рамках топливного кода SFPR, адекватного описания основных физических явлений, характеризующих поведение тепловыделяющих элементов в различных (в том числе аварийных) режимах работы ядерного реактора. Моделирование термомеханических, физико-химических (включая взаимодействие материалов твэлов и их теплообмен с теплоносителем), нейтронно-физических процессов в топливе и расчет выхода продуктов деления осуществляется с использованием вычислительных возможностей современных суперкомпьютеров.

Код SFPR совместим с другими разработанными в ИБРАЭ РАН программными средствами и может быть интегрирован в сквозную систему расчетных кодов, обеспечивающую анализ и обоснование безопасности АЭС с реакторными установками различных типов. Достоверность и высокая надежность предсказаний кода SFPR для оксидного топлива была подтверждена путем его верификации в рамках участия ИБРАЭ РАН в ряде международных проектов по развитию и применению топливных кодов в научных исследованиях (4th–6th Framework Programme of Euroatom, SAMANTHA, МНТЦ), а также в ходе практического применения российскими профильными организациями (ИБРАЭ РАН, ОАО «ГНЦ НИИАР», ОАО «Машиностроительный завод» и ряд других).

ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ ПРОЕКТЫ



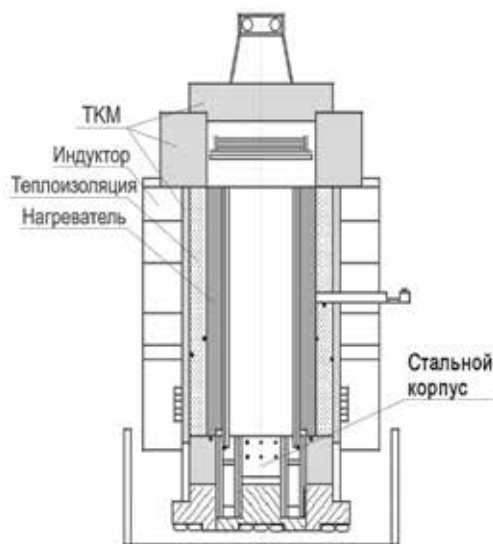
Проект RASPLAV-MASKA

Один из первых масштабных международных исследовательских проектов Института, RASPLAV, посвящен исследованию поведения расплавленного кориума на днище корпуса реактора. В проекте, который впервые проводился под эгидой Организации экономического сотрудничества и развития (ОЭСР) в стране, не входящей в эту организацию, объединили свои усилия 14 стран-участниц и Россия. Соответствующее соглашение было подписано в июле 1994 года.

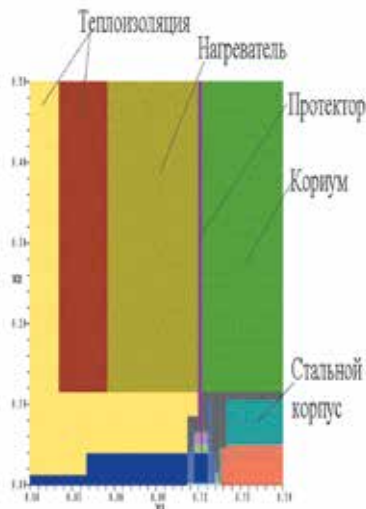
Главным исполнителем проекта являлся НИЦ «Курчатовский институт» (Руководитель проекта д.т.н. Асмолов В. Г.). Расчетно-теоретическое сопровождение экспериментов было возложено на ИБРАЭ РАН. Основное внимание уделялось исследованию теплогидравлических процессов в расплаве кориума и физико-химических процессов взаимодействия различных составляющих расплава.

Для моделирования экспериментов в рамках проекта был создан программный комплекс CONV-3D. Его расчетная модель включает в себя все основные компоненты экспериментальной установки AW-200, что позволяет с высокой надежностью прогнозировать поведение кориума, конструкционных материалов и узлов установки.

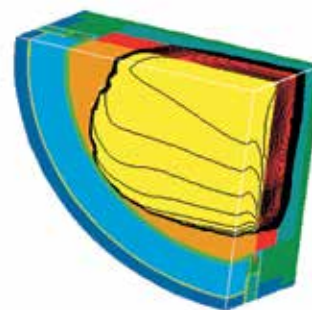
На 3-й Международной конференции МАГАТЭ «Реакторы на быстрых нейтронах и соответствующие топливные циклы. Ядерные системы нового поколения в целях устойчивого развития — БР 2017». Большов Л. А. — председатель программного комитета, ведущий ряда пленарных заседаний конференции



а)



б)



Форма слитка и расчетная изотерма ликвидуса для эксперимента AW-200-1

Схематический вид установки AW-200 (а) и (б) ее расчетная модель (1/2 часть)

Пре-тестовые расчеты продемонстрировали высокую предсказательную способность программных средств, которые в дальнейшем широко использовались при определении сценария эксперимента и анализе экспериментальных данных.

Установка «Расплав», Асмолов В. Г., Вишневский В. Ю., Семенов И. М., Стрижов В. Ф.

Результаты расчетов и теоретического анализа находятся в хорошем согласии с результатами экспериментов, что говорит о высоком качестве расчетных методов и схем. Так, сравнение тепломассопереноса для различных методов нагрева в зависимости от угла вдоль охлаждаемой поверхности подтверждает подобие процессов переноса, теоретически предсказанное в самом начале проекта. Хорошее согласие с данными экспериментов получено для относительной толщины корки. Форма слитка, полученного на экспериментальной установке, также хорошо согласуется с положением изотермы, соответствующей температуре ликвидуса.

По окончании второй фазы проекта RASPLAV был инициирован новый проект MASCA под эгидой ОЭСР, ориентированный на изучение физико-химического поведения расплава корнума, его взаимодействия с конструкционными материалами, распределения отдельных компонентов расплава и продуктов деления между металлической и оксидной фазами. По результатам работы получены новые данные относительно взаимодействия материалов при развитии аварии.

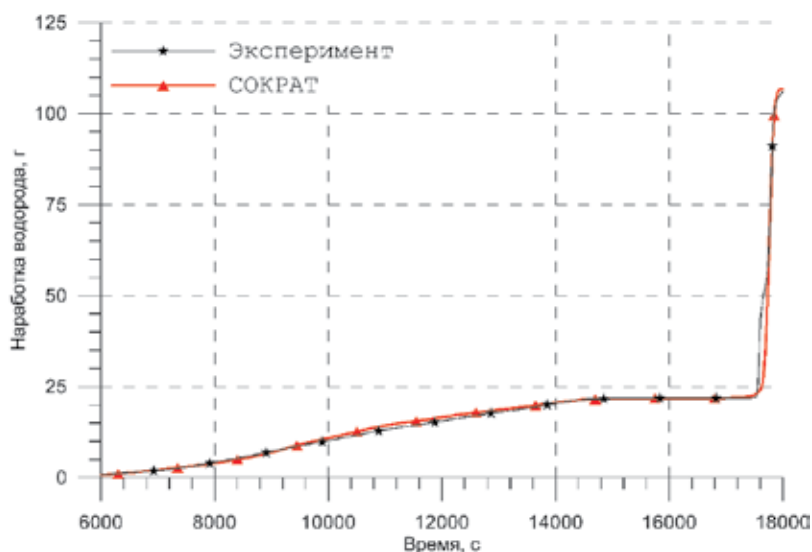


Проект PARAMETER

Обоснование пожаро- и взрывобезопасности АЭС в ходе тяжелой аварии, включая расчетно-экспериментальные исследования количественных характеристик источника водорода в условиях экстренной подачи воды в аварийный реактор и образования взрывоопасных концентраций водорода внутри ЗО, имеет огромное значение при проектировании современных энергоблоков.

Источником водорода при тяжелых авариях являются реакции взаимодействия водяного пара с конструкционными материалами. При контакте пара с разогретыми до высоких (более 1200°C) температур оболочками твэлов, стержнями-поглотителями и внутрикорпусными устройствами происходит интенсивная реакция окисления с образованием водорода. Между тем, при восстановлении систем энергоснабжения АЭС в качестве одной из мер по управлению аварией предусмотрена возможность подачи большого количества воды в а.з. с целью ее охлаждения и предотвращения плавления. Побочным эффектом интенсивной подачи воды при тяжелой аварии может быть резкая эскалация реакции окисления и быстрый выброс большого количества взрывоопасного водорода под защитную оболочку.

Международный проект PARAMETER посвящен изучению феноменологии формирования источника водорода при заливе водой перегретых сборок твэлов на установке ПАРАМЕТР (НПО «Луч», г. Подольск). Ряд экспериментов, выполненных в 2006–2009 гг., был посвящен изучению поведения топливныхборок РУ ВВЭР в условиях, характерных для тяжелых аварий. В подготовке и проведении этих экспериментов активно участвовали сотрудники ИБРАЭ РАН.



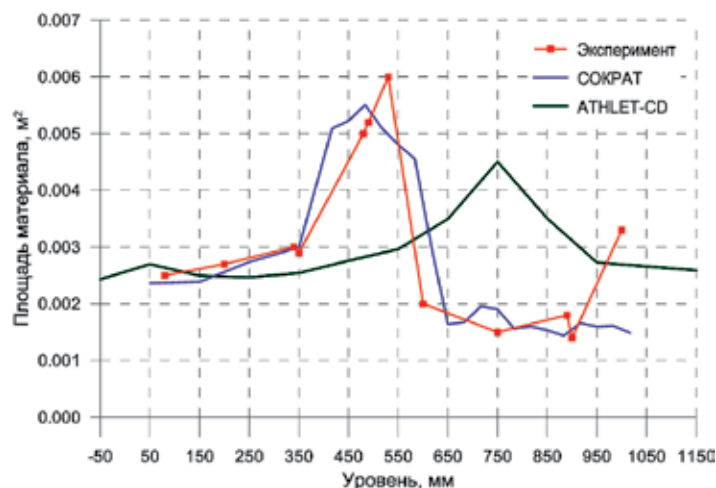
Выход водорода в эксперименте PARAMETER SF-4



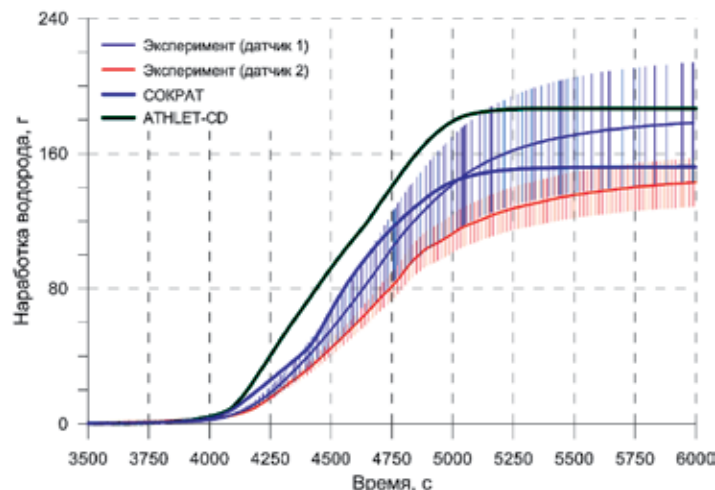
Татьяна Алексеевна Юдина

н.с. лаборатории анализа запроектных аварий на АЭС

«В экспериментах серии PARAMETER-SF1-SF4 сборка из 19 твэлов ВВЭР разогревалась в потоке паро-аргоновой смеси до определенной температуры, а затем заливалась водой сверху или комбинированно (сверху и снизу). Полученные экспериментальные данные использовались для верификации и кросс-верификации кодов, предназначенных для анализа безопасности АЭС: ICARE/CATHARE (НИЦ «Курчатовский институт»), ATHLET-CD (GRS, Германия), RELAP/SCDAPSIM MOD3.2 (ОКБ «Гидропресс»), MAAP4.07 (EdF, Франция), SCDAP/RELAP/IRS (PSI, Швейцария). Было показано, что по совокупности параметров (распределение толщины оксида по высоте сборки и характеристики источника водорода) разработанный в ИБРАЭ РАН интегральный код СОКРАТ демонстрирует хорошее соответствие эксперименту».



Распределение материала по высоте сборки после стекания расплава и выход водорода в эксперименте CORA-15 с твэлами под давлением



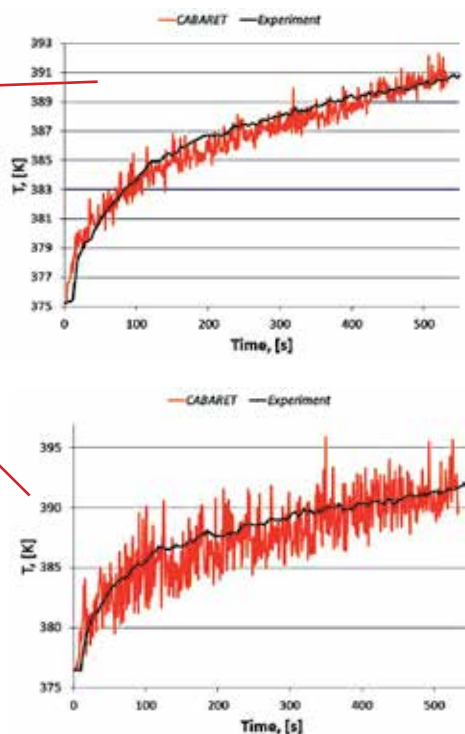
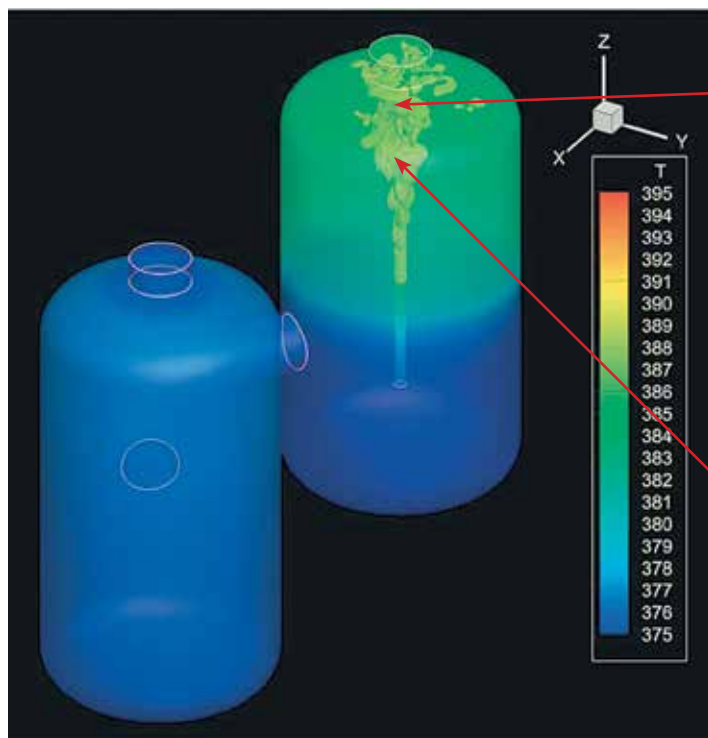
Проект FUMAC

Отдельные эксперименты с одиночными твэлами и сборками, проводившиеся в рамках разных проектов в последние 10 лет, указывают на то, что поведение твэлов с топливом высокого выгорания может существенно отличаться от поведения необлученных твэлов в сценариях с потерей теплоносителя. Это связано как с деградацией топливной таблетки, так и с изменением свойств оболочки в течение топливного цикла. В частности, важную роль играют процессы распухания топлива (изменение структуры таблетки, геометрии, теплофизических свойств), наводо-раживания оболочки твэла, изменение состава и геометрии газового зазора. Все эти процессы необходимо учитывать при моделировании деформации и разрыва оболочек твэлов при авариях, т.к. устоявшиеся подходы, даже консервативные, не позволяют воспроизвести важные последствия, например, фрагментацию топлива, которая приводит к выбросу частиц топлива в первый контур и к дополнительному выходу продуктов деления в теплоноситель, а также влияет на распределение тепловыделения по высоте твэла. Кроме того, на сегодняшний день сохраняется некоторая неопределённость в оценках взаимовлияния раздутия оболочек и процессов теплообмена твэла с теплоносителем, связанная с уменьшением проходного сечения в сборках.

Международный исследовательский проект FUMAC (FUEL Modelling in Accident Conditions), проведенный под эгидой МАГАТЭ с 2014 по 2017 гг., был направлен на углубление понимания физических процессов, определяющих термомеханическое поведение твэлов и выход продуктов деления, в том числе с учетом выгорания топлива, в сценариях проектных и тяжелых аварий с потерей теплоносителя, совершенствование и верификацию соответствующих моделей топливных и интегральных кодов. В качестве технической базы использовались экспериментальные исследования, выполненные ранее в разных странах.

10 — количество российских и зарубежных организаций и предприятий атомной отрасли, применяющих РК СОКРАТ при решении практических задач обеспечения безопасности АЭС и ЯРОО.

12 — количество стран, на АЭС которых используются реакторы ВВЗР и аналогичные им, построенные по российским проектам.



Изоповерхность поля температуры (слева), сравнение с экспериментальными данными (справа). Эксперимент PE4 (ERCOSAM-SAMARA)

Результаты моделирования экспериментов IFA-650.9 — IFA-650.11, проведенных на реакторе HALDEN (Норвегия) с одиночными отрезками отработанных твэлов ВВЭР (56 МВт сутки/кгU) и PWR (90 и 61 МВт сутки/кгU), показали, что код СОКРАТ хорошо моделирует всю совокупность измеренных данных, определяющих процессы разогрева, раздутия и разгерметизации облученного твэла. Поэтому результаты моделирования кодом СОКРАТ аксиального профиля температур в твэле, давления под оболочкой, тепловых потоков с поверхности оболочки, состава и расхода теплоносителя вдоль твэла использовались как начальные и граничные условия в международных численных бенчмарках, организованных на основе этих экспериментов для специализированных топливных кодов.

Моделирование вне реакторного интегрального эксперимента CORA-15 (Германия), где исследовалась сборка из 23 твэлов, нагруженных внутренним давлением, в условиях тяжелых аварий с потерей теплоносителя, подтвердило высокие прогнозные возможности кода СОКРАТ в части массовой разгерметизации оболочек в составе сборки на этапе разогрева твэлов. Также хорошее соответствие с экспериментальными данными получено для последующей деградации сборки, выхода водорода и распределения материала после стекания расплава.

Проект ERCOSAM/SAMARA

В обосновании водородной безопасности АЭС важную роль играет оценка пространственного распределения водорода под защитной оболочкой АЭС в аварийных условиях. Образование водорода в реакторах на тепловых нейтронах с водяным теплоносителем в режиме нормальной эксплуатации обусловлено разложением воды или пара под действием облучения в активной зоне реактора. При запроектной аварии с осушением активной зоны возникают условия для выделения водорода в термохимических реакциях пара с цирконием, топливом, конструкционными материалами и топлива с бетоном. Повышенная концентрация водорода внутри защитной оболочки АЭС в аварийных условиях может привести к взрыву с разрушением 30 и выходом радионуклидов в окружающую среду. Кроме того, большинство турбогенераторов, которые эксплуатируются на АЭС, имеют водородное охлаждение, и при их использовании необходимо предусматривать меры пожарной безопасности машинного зала.

В рамках сотрудничества Росатом — Евратом с 2010 по 2014 гг. выполнялись параллельно-согласованные проекты SAMARA и ERCOSAM. Они включали комплексные расчетно-экспериментальные исследования: стратификации легкого газа в экспериментах со сценарием, воспроизводящим последовательность

событий при тяжелой аварии с потерей теплоносителя на легководном реакторе; возможности разрушения стратификационного слоя при работе технических средств управления авариями (спринклеров, теплообменников-конденсаторов, пассивных автокаталитических рекомбинаторов). Начальные и граничные условия экспериментов основаны на характеристиках, полученных для тяжелой аварии «малая течь» в типовой защитной оболочке АЭС, с учетом масштабирования при переходе от АЭС к маломасштабным экспериментальным установкам.

В общей сложности проведено 15 экспериментов на установках разного масштаба — TOSQAN (7 м³), СПОТ (59 м³), MISTRA (100 м³) и PANDA (100 м³), а также численный бенчмарк на конфигурации концептуальной установки HUMIX масштаба, близкого к прототипу (3000 м³).

В аналитических исследованиях были задействованы программы вычислительной гидродинамики (CFD-коды) FLUENT, GASFLOW, CFX, OpenFOAM, а также коды в сосредоточенных параметрах GOTHIC, TONUS, COCOSYS, ASTEC, КУПОЛ-М, КУПОЛ-МТ, широко используемые в текущей практике обоснования безопасности АЭС. В рамках проектов ИБРАЭ РАН проводил доработку CFD-кодов универсального назначения FLUENT и OpenFOAM и оценку их возможностей для задач расчета распределения водорода в защитной оболочке АЭС.

В параллельном проекте приняли участие специалисты из трех российских (ИБРАЭ РАН, ГНЦ ФЭИ им. А. И. Лейпунского, ОАО «ОКБМ Африкантова»), шести европейских (PSI, FzJ, KIT, NRG, CEA, IRSN), одной канадской (AECL) и одной американской (NRC) научных организаций. ИБРАЭ РАН выполнял роль координатора российского проекта SAMARA.

Основные результаты и их приложения

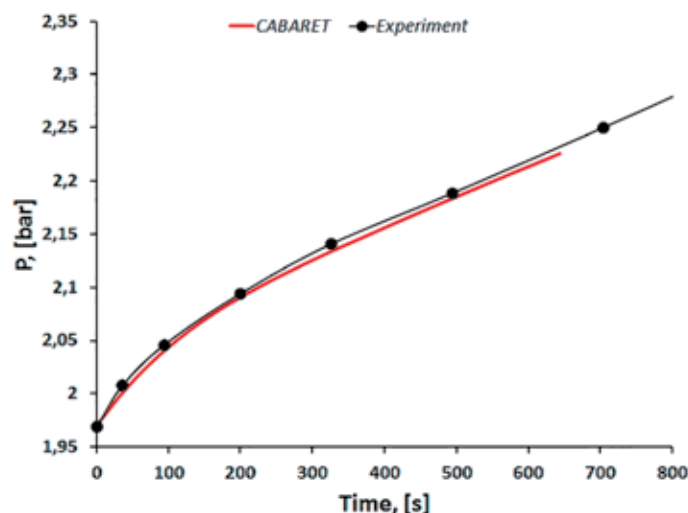
По итогам выполнения проектов создана база первичных экспериментальных данных по физическим явлениям, происходящим в защитной оболочке легководных реакторов во время постулируемых аварий с разрушением активной зоны, подготовлена CFD-технология для численного анализа теплогидравлики пароводородных смесей в защитной оболочке АЭС с ВВЭР при тяжелой аварии.

Результаты экспериментальной программы ERCOSAM/SAMARA широко используются специалистами ИБРАЭ для создания и проверки новых расчетных методик и кодов для обоснования водородной взрывобезопасности АЭС, позволяющих прецизионно мо-

делировать спектр явлений различной физической природы, протекающих в широком диапазоне временных и пространственных масштабов (естественная и вынужденная конвекция, диффузионное и турбулентное перемешивание среды, конденсация пара, радиационный теплообмен и другие).

Наиболее интересные результаты получены с использованием подхода, основанного на методике КАБАРЕ. Методика КАБАРЕ относится к вихреразрешающим методам с неявным моделированием подсеточных масштабов турбулентности. Данный метод позволяет проводить расчеты на сетках с неполным разрешением масштабов турбулентности без введения дополнительных настроечных параметров. Единственным источником неопределенностей является только сеточная модель, критерий выбора которой основан на анализе сходимости решения.

На рисунках приведены примеры расчета эксперимента PE4 на установке PANDA (проект ERCOSAM/SAMARA) по методике КАБАРЕ. На первом из них представлено распределение температуры на фазе вдува пара ($t=500$ сек), имитирующей поступление теплоносителя из реакторного устройства в защитную оболочку, и сравнение с показаниями термодатчиков, расположенных на разной высоте по оси струи. На втором рисунке приведен график зависимости давления в установке от времени. Совпадение давления с экспериментальными данными позволяет говорить о высокой точности моделирования пристеночной конденсации пара.



Давление в установке в зависимости от времени, сравнение с экспериментальными данными PE4 (ERCOSAM-SAMARA)

Хорошее совпадение результатов расчетов с измеренными данными указывает на высокие прогнозные возможности вихреразрешающей методики КАБАРЕ в части моделирования физических процессов, характерных для задач водородной безопасности, без использования настроечных параметров. Данный подход существенно упрощает проведение анализа влияния отдельных физических процессов на результат моделирования задачи в целом, делая его более прозрачным.

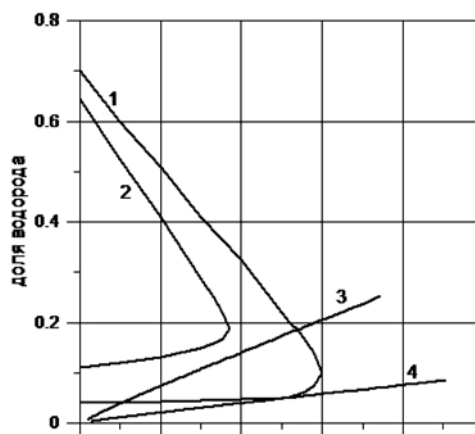
Использование тонкораспыленной воды для подавления горения и детонации водорода

Как показала авария на АЭС «Фукусима Дайичи» в марте 2011 г., сопровождавшаяся взрывами водорода с последующим выбросом радионуклидов в атмосферу, проблема водородной безопасности АЭС сохраняет свою актуальность.

В связи с этим и в продолжение работ в рамках программы ERCOSAM/SAMARA в ИБРАЭ РАН были проведены исследования, в результате которых предложены новые методы снижения риска и смягчения последствий водородного взрыва на АЭС с реакторными установками с водяным теплоносителем (ВВЭР, PWR, BWR). В частности, проводились исследования по возможному использованию тонкораспыленной воды для подавления детонации и горения водорода, как при тяжелых авариях на АЭС с ВВЭР, так и при авариях турбогенераторов с водородным охлаждением. Было показано, что введение в водородосодержащую смесь капельной взвеси с размерами капель порядка 100 мкм является эффективным способом подавления горения.

Предложено использовать для генерации потоков тонкораспыленной воды значительные запасы (более 200 тонн) перегретой воды, находящиеся в деаэраторах РУ. Истечение перегретой воды в среду с давлением ниже давления на линии насыщения приводит к вскипанию и дроблению струи на микрокапли (характерным размером порядка 100 мкм) и водяной пар, что позволяет отодвинуть состав водородосодержащей смеси от опасных пределов. Проведено численное моделирование теплогидравлических процессов и разработаны схемы подачи перегретой воды из деаэраторов, приводящие к разбавлению водородной струи и подавлению горения и детонации.

На основании результатов исследований получены два патента — патент на полезную модель № 113403 «Устройство для подавления детонации и горения водорода» и патент на изобретение № 2565230 «Установка для предотвращения горения и детонации водорода» (авторы Большов Л. А., Сегаль М. Д., Семенов В. Н.)



Семенов Владимир Николаевич

д.ф.-м.н., зам. заведующего отделением анализа безопасности ядерных энергетических установок



Сегаль Михаил Давидович

д.т.н., ведущий н.с. отделения развития систем аварийной готовности и реагирования

Подавление горения водорода за счет разбавления паром и тонкораспыленной водой при утечке водорода в турбогенераторе АЭС с РУ ВВЭР:

- 1 — предел горения;
- 2 — предел детонации;
- 3 — разбавление водородовоздушной смеси паром при турбулентном перемешивании (подача воды от деаэратора 30 кг/с);
- 4 — то же (подача воды 116 кг/с)

ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ РАЗРАБОТКИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ АЭС С РЕАКТОРНЫМИ УСТАНОВКАМИ С ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ. ПРОЕКТ «КОДЫ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ» ПРОЕКТНОГО НАПРАВЛЕНИЯ «ПРОРЫВ»



Мосунова Настасья Александровна

к.ф.-м.н., зам. руководителя Центра ответственности частного проекта «Коды нового поколения» по науке, зав. отделением разработки программного обеспечения для анализа безопасности АЭС

«С увлечением работаю в проекте над созданием нового поколения программного обеспечения для анализа безопасности АЭС с реакторными установками на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем. Интересно работать тогда, когда результаты используются на практике, а именно к этому этапу мы перешли несколько лет назад, когда наше программное обеспечение (а всего разработано 18 расчетных кодов, 6 из которых аттестовано в Ростехнадзоре) стало востребовано в проектно-конструкторских организациях и вузах. Конечно, это накладывает и большую ответственность за высокое качество результата, но мы готовы к таким вызовам. Хочется отметить, что за эти годы сформирован прекрасный коллектив из специалистов ИБРАЭ РАН и еще десятка ведущих научных институтов и организаций Госкорпорации «Росатом», объединяющий технологов, конструкторов, проектантов, теоретиков, вычислительных математиков, программистов и экспериментаторов. Могу с уверенностью сказать, что с такой командой нам по плечу успешно завершить еще не один проект».

Необходимость перевода российской экономики на инновационный путь развития обуславливает повышенные требования к обновлению научно-технической и производственной базы техногенных отраслей промышленности и энергетики. В области атомной энергетики эти требования, прежде всего, относятся к созданию более эффективных ядерных реакторов, использующих перспективные виды топлива, повышению безопасности обращения с ОЯТ и объектов ядерного топливного цикла, снижению экологических и радиационных рисков, связанных с эксплуатацией АЭС.

Большинство атомных реакторов работает на изотопе урана ^{235}U , содержание которого в природной урановой руде очень низкое (~0.7%). Уже в эпоху создания первых АЭС сложилось ясное понимание того, что устойчивое и долговременное развитие «мирного атома» возможно лишь на основе использования самого распространенного изотопа урана — ^{238}U . В настоящее время актуальной является задача перехода атомной энергетики на новую платформу, с широким применением реакторных установок на быстрых нейтронах, позволяющих существенно повысить степень использования природного урана. Существенными элементами этой технологической платформы должны стать также новые эффективные технологии переработки ОЯТ, извлечения из него делящихся материалов и производства уран-плутониевого топлива требуемого состава и с заданными свойствами.

На международном уровне решению данной проблемы посвящен ряд исследовательских программ, объединенных под общим названием «Поколение IV». В Российской Федерации принята и действует Федеральная целевая программа (ФЦП) «Ядерные энерготехнологии нового поколения на период 2010–2015 годов и на перспективу до 2020 года».

ИБРАЭ РАН с 2010 г. принимает участие в реализации ФЦП, возглавив проект, получивший краткое наименование «Коды нового поколения» — проект по разработке интегрированных систем кодов нового поколения для разработки и обоснования безопасности ядерных реакторов, проектирования АЭС, создания технологий и объектов ядерного топливного цикла. Под кодом нового поколения понимается программный продукт, основанный на



современных физических моделях, численных методах и технологиях программирования, обладающий возможностями проведения эффективных расчетов на высокопроизводительных вычислительных системах, дружественным интерфейсом пользователя и автоматизированной связью с конструкторской моделью изделия (для трехмерных кодов). Такие коды необходимы для своевременной и качественной разработки проектов и обоснования их безопасности.

Проект «Коды нового поколения» входит в состав проектного направления «Прорыв», предусматривающего создание научно-технологической базы для крупномасштабного развития атомной энергетики на принципах естественной безопасности и замкнутого ядерного топливного цикла.

В соответствии с приказом Госкорпорации «Росатом» на базе ИБРАЭ РАН создан центр ответственности по реализации проекта «Коды нового поколения».

В реализации проекта участвуют ведущие организации атомной отрасли, учебные центры, институты:

- конструкторские: АО «НИКИЭТ», АО «ОКБМ Африкантов», АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС»;
- проектные: АО «АТОМПРОЕКТ», АО «ВНИПИпромтехнологии»;
- научно-исследовательские институты (центры) и научно-производственные объединения: АО «ВНИИНМ», АО «НПО ЦКТИ»,

2-й в 2018 г. семинар по проекту «Коды нового поколения» по теме «Требования к интегральному стенду со свинцовым теплоносителем для верификации контурных теплогидравлических кодов. Состояние разработки двухфазного CFD модуля в рамках проекта «Коды нового поколения». Выступает начальник отдела теплофизики АО «НИКИЭТ» Афремов Д. А.

Коробочная версия кодов нового поколения



АО «ГНЦ РФ-ФЭИ», ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е. И. Забабахина»;

- национальный исследовательский центр и государственный научный центр: НИЦ «Курчатовский институт», АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»;
- институты: ОИВТ РАН, ИПМ им. М. В. Келдыша РАН, ИВМ РАН, ИТ СО РАН;
- учебные центры: НИЯУ МИФИ, МГУ им. М. В. Ломоносова, ТПУ и ряд других организаций.

В рамках проекта «Коды нового поколения» к началу 2018 г. разработана линейка расчетных кодов для моделирования различных режимов работы существующих и проектируемых АЭС с реакторными установками на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем, объектов замкнутого ядерного топливного цикла, распространения продуктов деления в окружающей среде и их воздействия на население:

- **MCU-FR** (НИЦ «Курчатовский институт») — нейтронно-физический код на базе метода Монте-Карло для расчета нейтронно-физических характеристик реактора, защиты и объектов замкнутого ядерного топливного цикла;
- **ODETTA** (ИБРАЭ РАН, ИПМ им. М. В. Келдыша РАН) — нейтронно-физический код на базе методов конечных элементов и дискретных ординат для расчета активной зоны, защиты и объектов замкнутого ядерного топливного цикла;
- **CORNER** (ИБРАЭ РАН) — нейтронно-физический расчетный код на базе приближения дискретных ординат (S_n) для расчета полей нейтронов и фотонов в активной зоне реакторных установок (РУ);
- **BPS** (ИБРАЭ РАН) — код расчета выгорания ядерного топлива;
- **HYDRA-IBRAE/LM** (ИБРАЭ РАН, АО «ОКБМ Африкантов», АО «НИКИЭТ», НИЯУ МИФИ, НИЦ «Курчатовский институт») — системный теплогидравлический код, позволяющий моделировать все контуры циркуляции теплоносителя АЭС с реакторной установкой на быстрых нейтронах;
- **ЛОГОС** (ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ») — версия кода CFD ЛОГОС, доработанная для обеспечения моделирования процессов тепломассопереноса в элементах оборудования реакторной установки на быстрых нейтронах;
- **CONV-3D** (ИБРАЭ РАН, ИПМ им. М. В. Келдыша РАН) — CFD-код на базе DNS приближения для детальных исследований локальных процессов тепломассопереноса в элементах оборудования реакторной установки и помещениях АЭС;
- **БЕРКУТ** (ИБРАЭ РАН, АО «ВНИИНМ», АО «ГНЦ РФ-ФЭИ», ОИВТ РАН) — код для обоснования поведения твэлов в режимах нормальной эксплуатации и нарушений нормальной эксплуатации быстрых реакторов;

- **КУПОЛ-БР** (АО «ГНЦ РФ-ФЭИ») — код для моделирования процессов распространения продуктов деления и тепло-массобмена в системе помещений АЭС;
- **РОМ** (ИБРАЭ РАН) — код для оценки радиационной обстановки при атмосферном переносе;
- **РОУЗ** (ИБРАЭ РАН) — трехмерный код для оценки радиационной обстановки на промплощадке;
- **Сибилла** (ИБРАЭ РАН) — код для расчета облучения по водным путям;
- **GeRa** (ИБРАЭ РАН, ИВМ РАН) — код для обоснования безопасности захоронения всех видов подготовленных радиоактивных отходов технологических переделов замкнутого ядерного топливного цикла;
- **CRISS 5.3** (АО «ОКБМ Африкантов») — код для вероятностного анализа безопасности и оценки рисков энергоблоков;
- **ВИЗАРТ** (ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е. И. Забабахина») — код для расчета баланса материалов и нуклидных потоков технологических схем замыкающих переделов ядерного топливного цикла и отдельных производственных участков;
- **КОД ТП** (ТПУ, АО «ВНИИНМ») — код для имитации работы технологической схемы завода или отдельных производственных участков в режиме реального времени для исследования работоспособности, управляемости и оптимизации процессов, узлов и установок, а также систем контроля и управления как отдельных элементов схемы, так и производственных линий;
- **СОКРАТ-БН** (ИБРАЭ РАН, АО «ОКБМ Африкантов», АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ») — интегральный расчетный код для обоснования безопасности АЭС с реакторными установками с натриевым теплоносителем;
- **ЕВКЛИД** (ИБРАЭ РАН, АО «ОКБМ Африкантов», АО «НИКИЭТ», НИЯУ МИФИ) — интегральный универсальный (моделируются различные типы теплоносителя (натрий, свинец, свинец-висмут, вода, воздух) и топлива (оксидное и нитридное)) расчетный код для обоснования безопасности АЭС с реакторной установкой на быстрых нейтронах.

В конце 2017 г. была проведена первая Школа-семинар по обучению кодам нового поколения HYDRA-IBRAE/LM, БЕРКУТ, ЕВКЛИД, GeRa, СОКРАТ-БН. В школе приняли участие специалисты из 17 организаций, включая вузы, подведомственные Госкорпорации «Росатом» и коммерческие компании, что свидетельствует о большом интересе к разработанному программному обеспечению. Школа-семинар получила высокую оценку у ее участников.



Полученные в проекте «Коды нового поколения» научно-технические результаты опубликованы в ведущих рецензируемых российских и зарубежных журналах, таких как «Теплоэнергетика», Атомная энергия», «Известия РАН: Энергетика», «ВАНТ», «Радиохимия», «Журнал технической физики», «Advanced Materials Research», «Nuclear Engineering and Design», «Journal of Physics: Conference Series» и других. Только за последние три года по данной тематике специалистами ИБРАЭ РАН опубликовано 33 статьи.

Кроме того, разработанные модели, программы, результаты их верификации и прикладных расчетов рассмотрены на таких ведущих российских и международных конференциях как Международная конференция по быстрым реакторам FR17, Российская научная конференция «Радиационная защита и радиационная безопасность в ядерных технологиях», Научно-техническая конференция «Теплофизика реакторов нового поколения», Международная научно-практическая конференция по атомной энергетике «Безопасность, эффективность, ресурс», Международная конференция «Супервычисления и математическое моделирование», Всероссийская конференция «Теплофизика и физическая гидродинамика», Международная научно-техническая конференция «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики» и других.

На практическом занятии по коду ЕВКЛИД первой Школы-семинара по обучению кодам нового поколения

Учебные пособия первой Школы-семинара по обучению кодам нового поколения HYDRA-IBRAE/LM, БЕРКУТ, ЕВКЛИД, GeRa, СОКРАТ-БН





Системный теплогидравлический код HYDRA-IBRAE/LM для реакторов на быстрых нейтронах

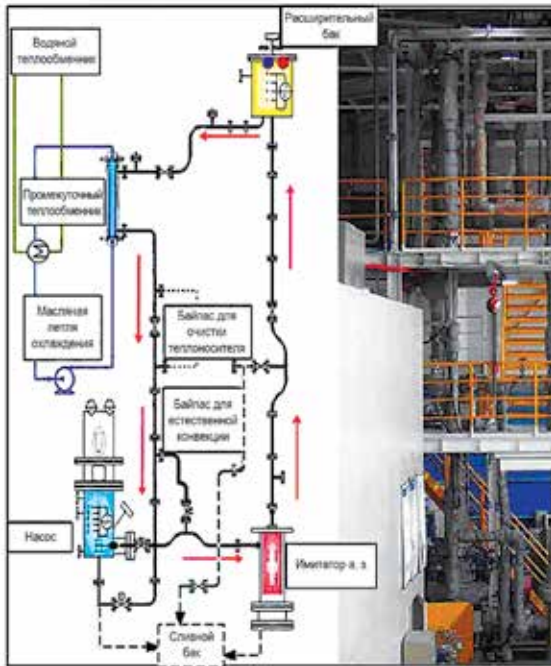
Системный теплогидравлический код HYDRA-IBRAE/LM предназначен для решения задач нестационарной теплогидравлики применительно к реакторным установкам и экспериментальным стендам с натриевым, свинцовым и свинцово-висмутовым теплоносителями. Код базируется на двухжидкостной и трехжидкостной моделях теплогидравлики и полностью соответствует современному уровню развития вычислительной техники. Кроме того, он ориентирован на массовые вычисления с анализом неопределенностей. Код аттестован в Ростехнадзоре (аттестационный паспорт программного средства № 426 от 27 февраля 2018 г.).

В настоящее время проводится внедрение кода в промышленную эксплуатацию. Он уже поставлен в АО «НИКИЭТ», АО «ОКБМ Африкантов» и Частное учреждение «ИТЦП «ПРОРЫВ» для расчетного моделирования различных режимов работы РУ БН-600, БН-800, БН-1200, БРЕСТ-ОД-300. Код HYDRA-IBRAE/LM стал первым российским кодом, с использованием которого стало возможным проведение интегрального расчета поведения реакторной установки со свинцовым теплоносителем в режиме, вызванном исходным событием «разрыв трубки парогенератора».

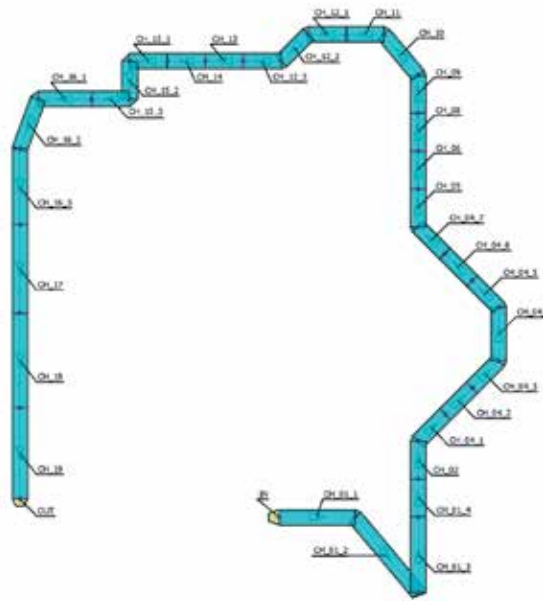
Участники первой Школы-семинара по обучению кодам нового поколения HYDRA-IBRAE/LM, БЕРКУТ, ЕВКЛИД

Группа разработчиков кода HYDRA-IBRAE/LM (слева направо): к.ф.-м.н. Алипченков В. М., Ильясова О. Х., к.ф.-м.н. Палагин А. В., Колташев Д. А., Рубцова Е. В., д.ф.-м.н. Стрижов В. Ф., к.ф.-м.н. Мосунова Н. А.



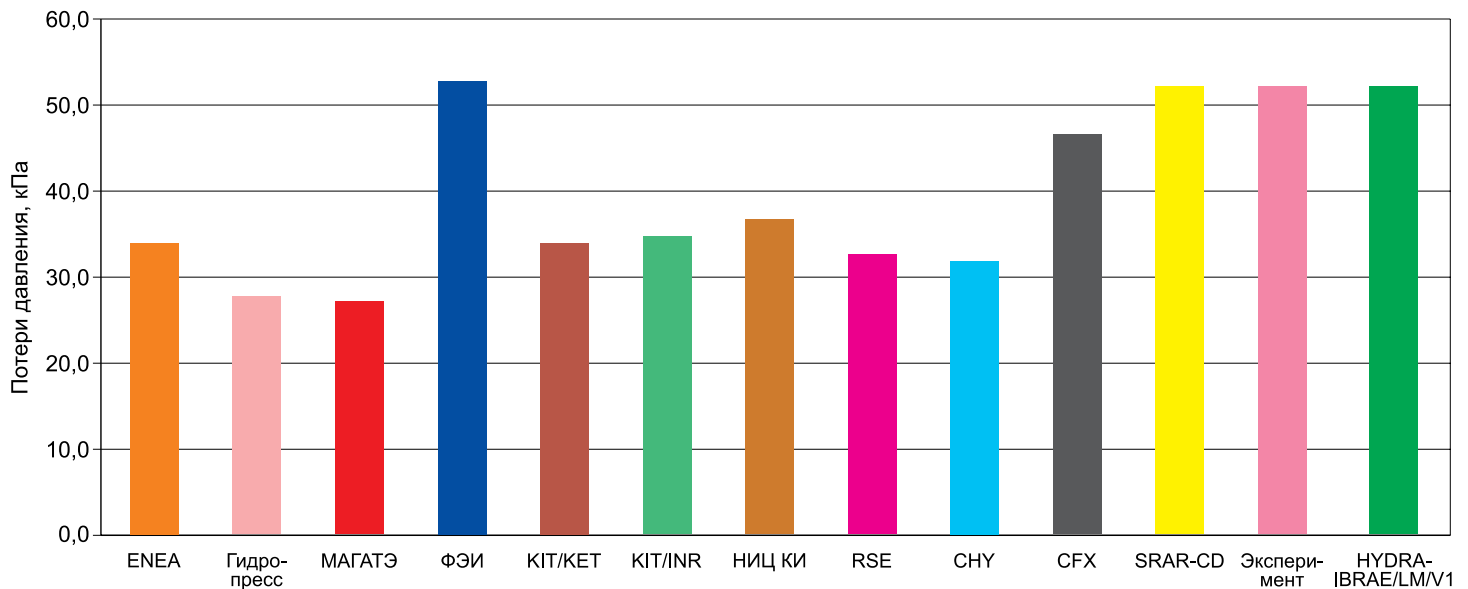


а)



б)

Внешний вид (а) и расчетная схема (б) экспериментальной установки HELIOS



На рисунке представлены результаты расчета по коду HYDRA-IBRAE/LM сформулированного Агентством по ядерной энергии при ОЭСР бенчмарка по изучению гидравлических процессов, протекающих в свинцово-висмутовом теплоносителе на установке HELIOS. Видно, что код HYDRA-IBRAE/LM по качеству результата не уступает лучшим мировым аналогам.

Сравнение результатов расчетов потерь давления на трение в активной зоне для расхода 13,57 кг/с, полученных кодом HYDRA-IBRAE/LM, с результатами участников бенчмарка

DNS код CONV-3D

Прецизионный масштабируемый вихреразрешающий CFD код на базе DNS приближения CONV-3D, ориентированный на суперкомпьютерные вычислительные ЭВМ, предназначен для проведения теплогидродинамических расчетов различных типов однофазного теплоносителя, в том числе, водяного и жидкометаллических (натрий, свинец, свинец-висмут).

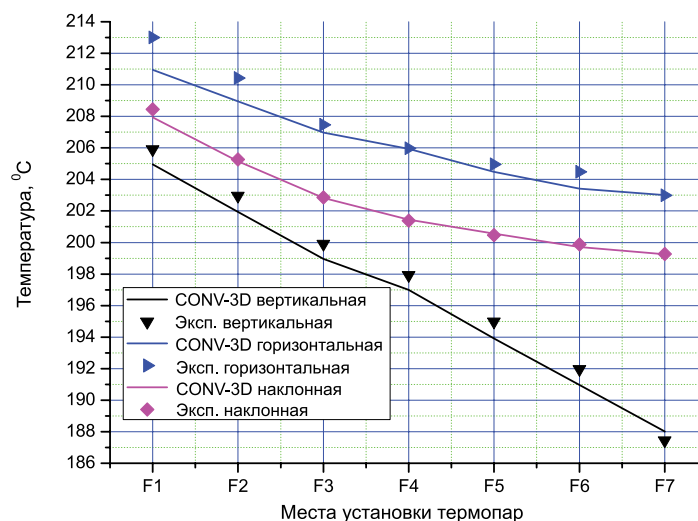
CONV-3D — один из немногих в Российской Федерации CFD кодов для прямого численного моделирования, написанный из первых принципов, обеспечивающий расчет тепло- и гидродинамики практически всех актуальных классов задач, востребованных промышленностью. Он обладает существенным преимуществом по сравнению с традиционно используемыми RANS кодами, которые требуют подбора моделей турбулентности и соответствующих коэффициентов для изучаемого класса течений. Для кодов DNS класса такой проблемы не существует, что позволяет сократить количество неопределенностей, а наличие суперкомпьютеров дает возможность существенно повысить не только точность вычислений, но и быстродействие в оценке результатов и принятия решений. В настоящее время код проходит процедуру аттестации в Ростехнадзоре.

Результаты опытной эксплуатации кода в АО «НИКИЭТ», АО «ОКБМ Африкантов» и подготовленный верификационный отчет подтвердили высокую предсказательную способность кода CONV-3D. Погрешность получаемых с помощью кода результатов составила около 10%. Надо отметить, что в случае кодов DNS класса погрешность может быть минимизирована за счет использования более подробных сеток при наличии мощных суперкомпьютеров у инженеров-расчетчиков.

На рисунке представлены результаты «слепых» расчетов по коду CONV-3D конвективного течения натрия в участке трубопровода с разной ориентацией в пространстве (эксперименты выполнены в ИМСС УрО РАН по заказу АО «ОКБМ Африкантов» для обоснования натриевого трубопровода САОТ БН-1200). В экспериментах наблюдается стратификация теплоносителя при естественно-конвективном течении и формирование рециркуляционных зон с большими градиентами и пульсациями температур, которые обуславливают термоциклические нагрузки. Результаты «слепых» расчетов экспериментов по коду CONV-3D демонстрируют хорошее качественное и количественное совпадение с экспериментом.

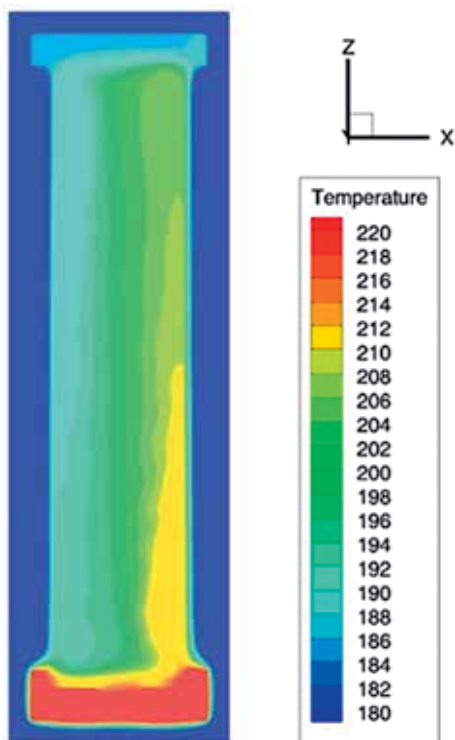


Лаборатория вычислительной теплогидродинамики. Группа разработчиков кода CONV-3D. Стоят слева направо: к.ф.-м.н. Леонов А. А., Коротков А. А., Макаревич А. А., сидят слева направо: к.ф.-м.н. Аксенова А. Е., к.ф.-м.н. Чуданов В. В., Первичко В. А.

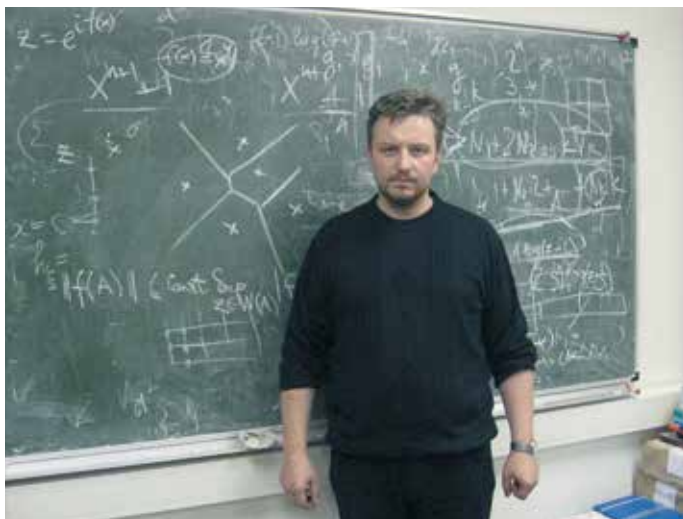


Температура в мониторинговых точках для разных положений трубопровода с аспектным отношением $l/d=5$. Сравнение результатов расчетов по коду CONV-3D с экспериментальными данными ИМСС УрО РАН

Нейтронно-физический код CORNER



Поле температур в центральном сечении, полученное по коду CONV-3D для экспериментов, выполненных в ИМСС УрО РАН



Сотрудник лаборатории вычислительной теплогидродинамики к.ф.-м.н. Горейнов С. А., разработчик алгоритмов и солверов для супер-ЭВМ

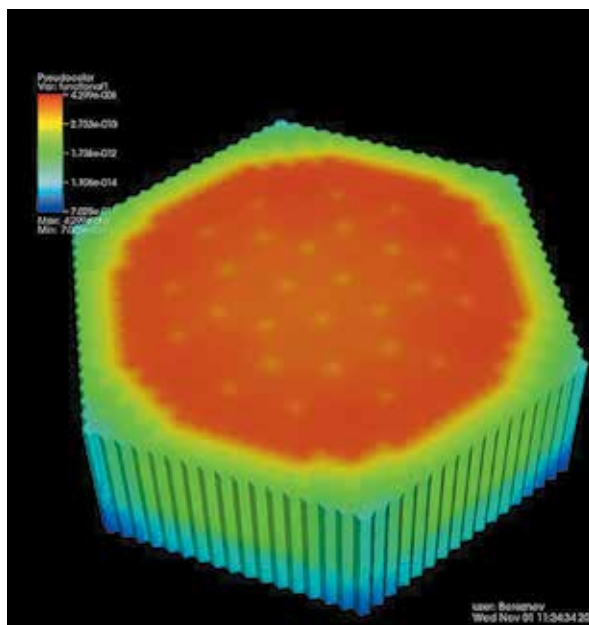
Трехмерный детерминистический расчетный код CORNER основан на S_N методе дискретных ординат и позволяет решать полный спектр задач, необходимых для анализа нейтронно-физических процессов в реакторах на быстрых нейтронах, в том числе и нестационарные задачи в улучшенном квазистатическом приближении. В качестве базовой рассматривается трехмерная гексагональная геометрия. Особенностью кода является возможность пространственной детализации расчетной модели за счет использования вложенных сеток.

Расчетный код работает с отечественным константным обеспечением CONSYST/БНАБ-РФ (АО «ГНЦ РФ-ФЭИ»). В расчетном коде реализован интерфейс параллельных вычислений OpenMP, позволяющий повысить быстродействие на 4-х ядерном персональном компьютере примерно в 3 раза.

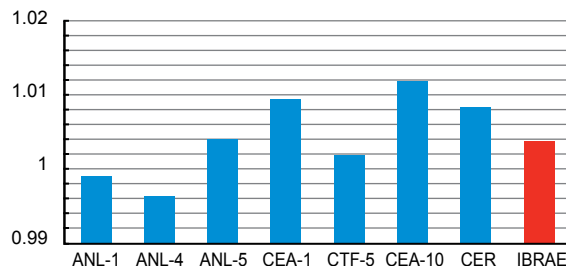
Проведена верификация кода на экспериментах БФС (по результатам расчетов которых код показал очень хорошее согласие при оценке пустотного эффекта реактивности), международных бенчмарк-моделях, а также кросс-верификация с прецизионным кодом MCU-FR на модели реактора БРЕСТ-ОД-300.

В настоящее время расчетный код входит в состав универсального кода нового поколения ЕВКЛИД/V1, используется в качестве контрольно-реперного модуля для аттестованного программно-технического комплекса ГЕФЕСТ800, предназначенного для сопровождения эксплуатации реактора БН-800.

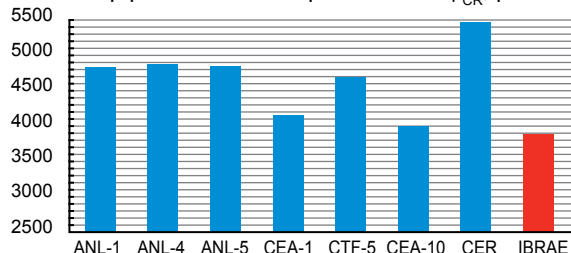
На рисунке (на след. стр.) на примере международного бенчмарка, подготовленного Агентством по ядерной энергии при ОЭСР в рамках международного форума GenIV, представлена визуализация поля нейтронов в модели SFR CAR-3600, а также результаты расчетов $K_{эфф}$ и эффективности стержней СУЗ, демонстрирующие хорошее согласие с ведущими зарубежными аналогами (ANL-1, 4, 5 — США, CEA-1, 5, 10 — Франция, CER — Германия), использующими различные методы моделирования (диффузионное, транспортное приближение и метод Монте-Карло) и библиотеки оцененных ядерных данных (ENDFB, JEFF).



Эффективный коэффициент размножения нейтронов $K_{эфф}$



Эффективность стержней СУЗ $\Delta\rho_{CR}$, pcm



Пространственное распределение плотности потока нейтронов в бенчмарк-модели SFR CAR-3600 и интегральные параметры ($K_{эфф}$, эффективность стержней СУЗ)

Твэльный код БЕРКУТ

Твэльный код БЕРКУТ предназначен для механистического описания поведения одиночного твэла контейнерного типа с таблеточным оксидным (диоксид урана или смешанное оксидное уран-плутониевое) и нитридным (мононитридное или смешанное нитридное уран-плутониевое) топливом, с газовым и металлическим подслоем в штатных, переходных и аварийных режимах перспективных активных зон реакторов на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем (БН-600, БН-800, БРЕСТ-ОД-300, СВБР-100 и др.). Разработанный код может быть использован:

- в составе интегрального кода (ЕВКЛИД) совместно с теплогидравлическим, нейтронно-физическим и другими модулями;
- как самостоятельный расчетный код и инструмент для решения следующих задач:
 - постановка, обоснование и сопровождение реакторных и электротермических испытаний топлива в экспериментальных твэлах;
 - анализ результатов испытаний топлива;
 - оптимизация топливной композиции и материала оболочки;
 - прогнозирование ресурсной работоспособности топлива и твэла;
- для проведения статистических расчетов, позволяющих:
 - получить оценку влияния отклонений конструкторско-технологических параметров, неопределенностей в свойствах материалов и режимах работы реактора на термомеханическое состояние твэла;

- провести расчетные статистические исследования для оценки разброса в состоянии твэлов а.з. быстрых реакторов;
- определить параметры физических моделей, имеющих наибольшее влияние на результаты расчетов и требующих надежного определения.

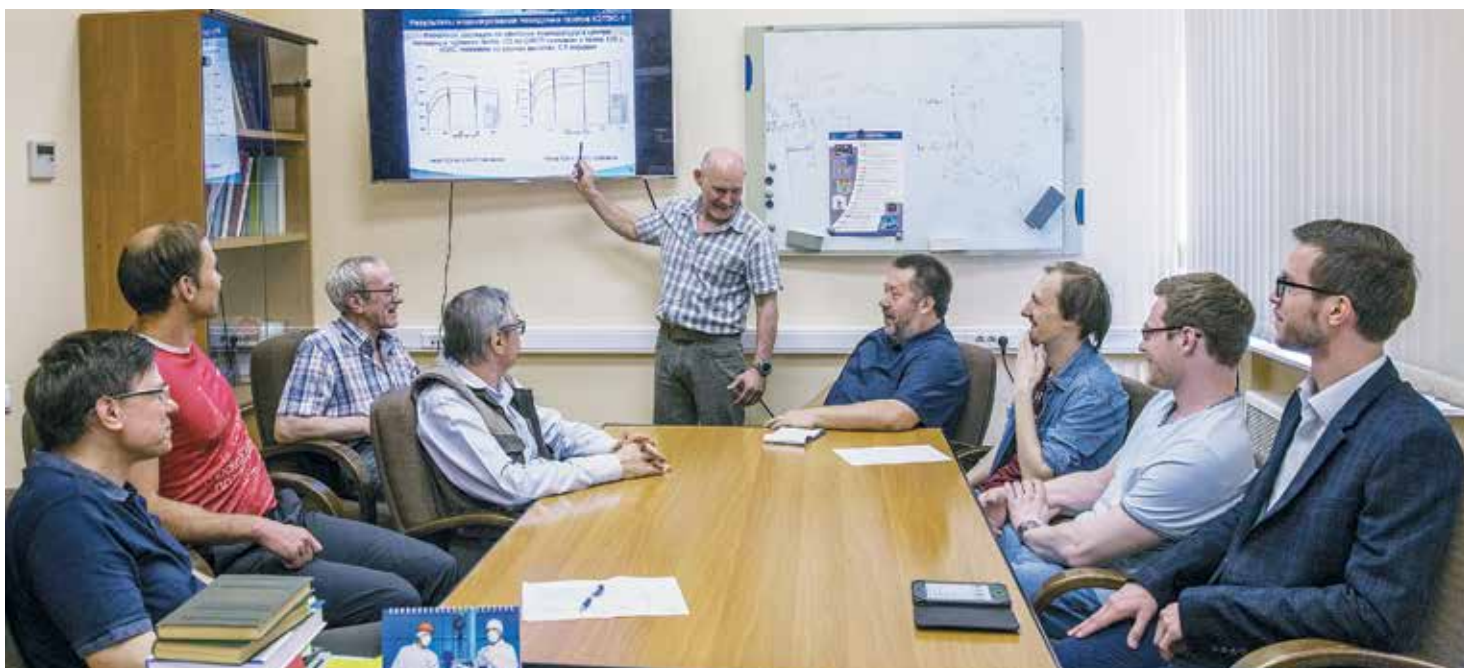
Модели кода основаны на современных представлениях о механизмах, управляющих основными физико-химическими процессами, протекающими в твэле. Код является мультимасштабным: описываемые объекты характеризуются размерами в диапазоне от 1 нм до 1 м.

На микроуровне код описывает эволюцию микроструктуры топлива в масштабе топливного зерна:

- вакансионные/межузельные поля, зарождение и рост дислокационной сетки и газонаполненной пористости;
- генерацию продуктов деления, их радиоактивные взаимопревращения, перенос и выход из топливных зерен;
- формирование химических соединений и фаз.

На мезоуровне модели кода описывают процессы в масштабе топливной таблетки:

- массоперенос продуктов деления, кислорода или азота;
- эволюцию технологической пористости и формирование столбчатых зерен;
- выход продуктов деления за счет механизмов отдачи и выбивания.



На макроуровне код описывает термомеханическое поведение ТВЭЛ как целого:

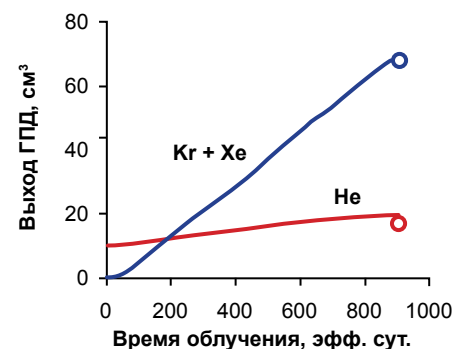
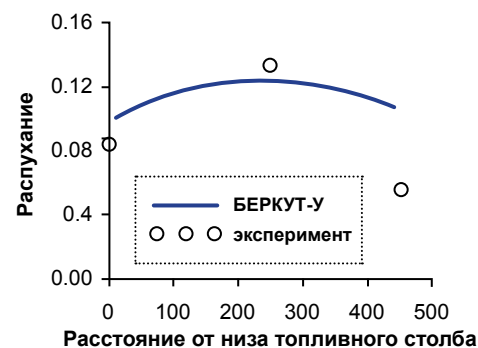
- теплопередачу внутри ТВЭЛ и теплообмен с теплоносителем;
- распределение температуры в топливе, газовом зазоре и оболочке ТВЭЛ;
- эволюцию напряженно-деформированного состояния топлива и оболочки, механическое состояние оболочки, время и причины разгерметизации;
- газовое давление под оболочкой, состав и активность газообразных продуктов деления, вышедших из топлива под оболочку ТВЭЛ;
- концентрации и активность газообразных продуктов деления, выходящих в теплоноситель при разгерметизации.

Модели кода, описывающие процессы в оксидном топливе, общие для реакторов на тепловых и быстрых нейтронах, валидировались с использованием обширного объема данных, имеющих в литературе. Отдельные микроскопические параметры как для оксидного, так и нитридного топлива фиксировались, исходя из теоретических оценок либо из данных, полученных в соответствующих частных экспериментах.

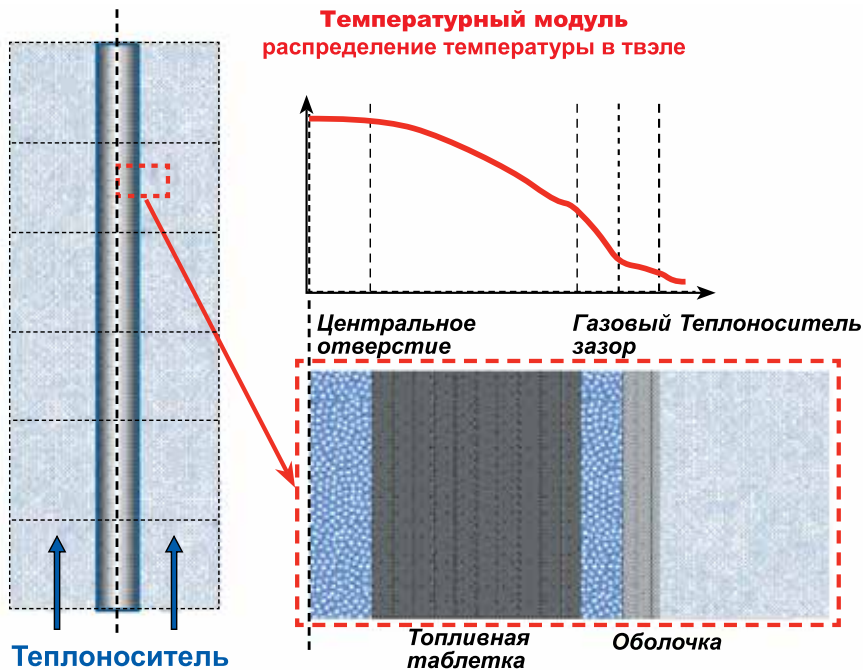
Анализ результатов моделирования кодом БЕРКУТ состояния ТВЭЛ с оксидным и нитридным топливом, облученных в РУ БН-600 и БОР-60, показал, что ТВЭЛный код БЕРКУТ корректно воспроизводит распухание топлива и оболочки, выход газообразных продуктов деления, профили пористости и концентраций продуктов деления.

Полученные результаты позволяют ожидать, что разработанный ТВЭЛный код БЕРКУТ может использоваться не только для обоснования работоспособности ТВЭЛ, но и для повышения глубины выгорания за счет прогнозирования требуемых параметров топливной композиции и конструктивных характеристик ТВЭЛ.

Разработчики кода БЕРКУТ. Слева направо: к.ф.-м.н. Шестак В. Е., к.ф.-м.н. Тарасов О. В., к.ф.-м.н. Чернов С. Ю., к.ф.-м.н. Озрин В. Д., к.ф.-м.н. Тарасов В. И., к.ф.-м.н. Болдырев А. В., Долинский И. О., Половников П. В., Задорожный А. В.



Моделирование эксперимента БОРА–БОРА



Топливный модуль
(эволюция внутри- и межзеренной
микроструктуры топлива)



Деформационный модуль
(напряженно-деформированное
состояние твэла)



Универсальный интегральный расчетный код ЕВКЛИД

Интегральный расчетный код ЕВКЛИД предназначен для анализа и обоснования безопасности АЭС с реакторными установками на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем в режимах нормальной эксплуатации и при нарушениях нормальной эксплуатации, включая аварии с разрушением или плавлением активной зоны или ее элементов.

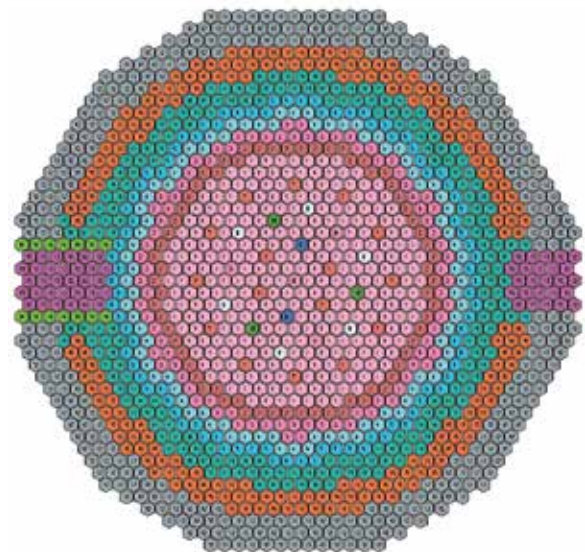
Вычислительной основой кода являются подробные математические модели установившихся и динамических теплогидравлических, нейтронно-физических, термомеханических и других процессов, важных для обоснования безопасности АЭС.

Код имеет модульную структуру и включает в себя:

- нейтронно-физический модуль (DN3D с кинетической опцией на базе кода CORNER);
- теплогидравлический модуль (HYDRA-IBRAE/LM);
- твэльный модуль (БЕРКУТ);
- модуль расчета выгорания (BPSD);
- модули переноса продуктов деления, активации и коррозии в первом контуре и газовой системе реакторной установки (AEROSOL/LM, OXID, TRITIUM);
- модуль расчета массопереноса и распространения продуктов деления в помещениях АЭС (КУПОЛ-БР или HYDRA-IBRAE/LM);
- модуль для расчета разрушения твэлов и активной зоны (SAFR);

Модель расчетного кода БЕРКУТ

Картограмма модели активной зоны
реакторной установки БН-1200





- модуль расчета радиационной обстановки за пределами промышленной площадки объекта использования атомной энергии (РОМ).

Возможны как автономное использование каждого модуля, так и связанный расчет задач в мультифизической постановке, то есть с учетом влияния различных физических процессов друг на друга. Отдельные модули кода верифицированы на большом наборе аналитических и численных тестов, а также результатах экспериментальных исследований различных физических явлений, имеющих место в реакторных установках с жидкометаллическим теплоносителем. Интегральный код верифицирован на экспериментальных данных, полученных на энергоблоке с реакторной установкой БН-600, проводится верификация на экспериментальных данных с реакторных установок БН-800 и БОР-60.

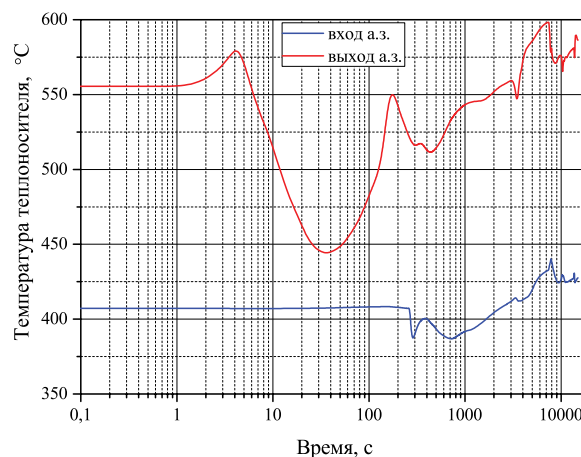
С использованием кода выполнены расчеты режимов работы реакторных установок БРЕСТ-ОД-300 и БН-1200, в том числе, с вводом полного запаса реактивности, течью парогенератора и потерей системного электроснабжения.

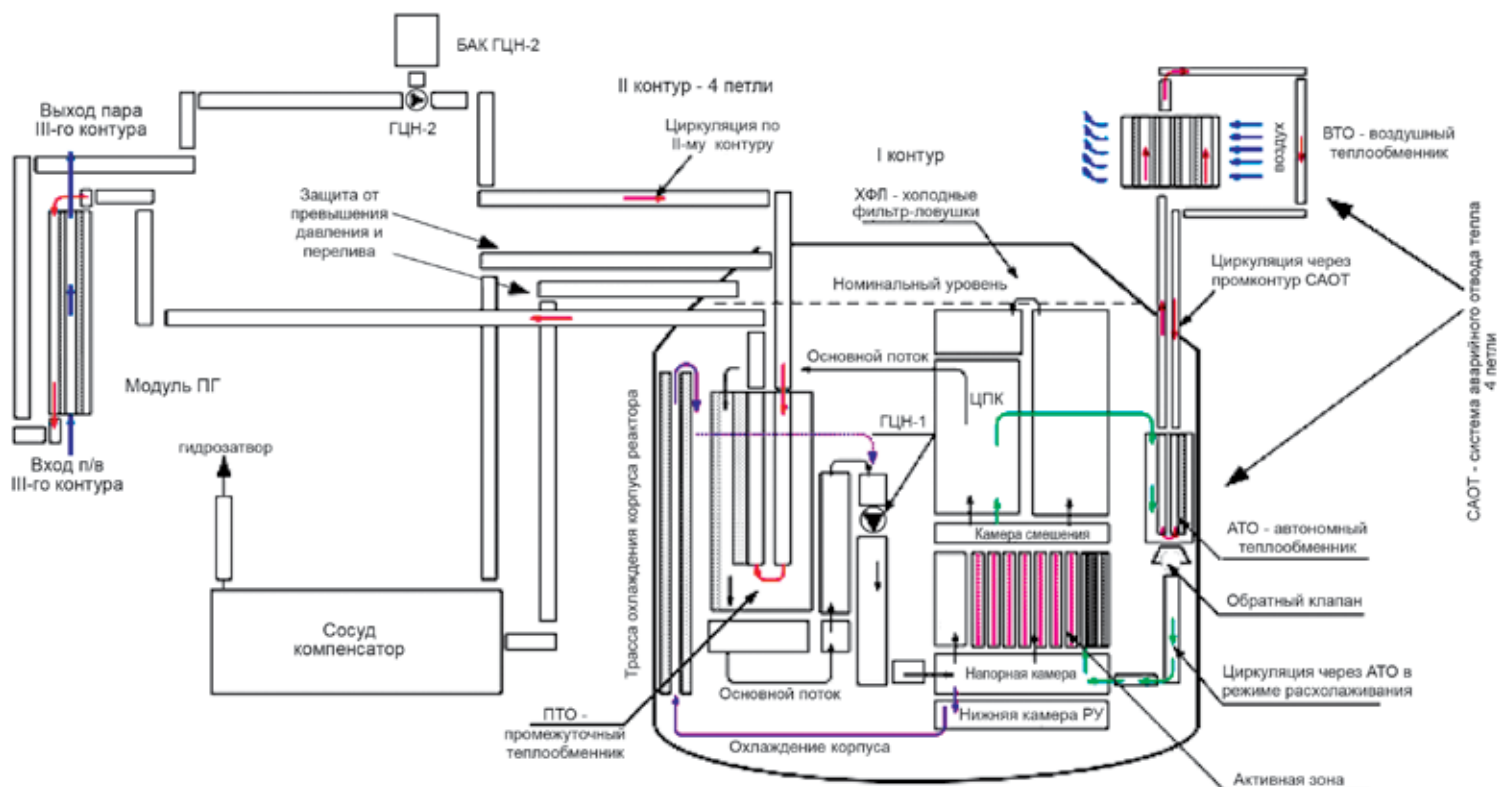
Универсальный расчетный код может применяться для детерминистического анализа поведения АЭС с реакторными установками на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем в различных режимах работы.

Расчетный код ЕВКЛИД может также использоваться при проведении практических работ в высших учебных заведениях, осуществляющих подготовку специалистов атомной отрасли.

Группа разработчиков кода ЕВКЛИД. Слева направо, сидят: Рубцова Е. В., Ильясова О. Х., к.ф.-м.н. Палагин А. В., к.ф.-м.н. Болдырев А. В., к.ф.-м.н. Алипченков В. М., д.ф.-м.н. Стрижов В. Ф. Стоят: Белов А. А., Вепрев Д. П., к.ф.-м.н. Сорокин А. А., Половников П. В., Беликова Г. В., к.ф.-м.н. Шестак В. Е., к.ф.-м.н. Мосунова Н. А., Давыдов А. В., к.ф.-м.н. Чернов С. Ю., д.т.н. Селезнев Е. Ф., к.т.н. Березнев В. П., Колташев Д. А., к.т.н. Чернова И. С.

Зависимости температуры теплоносителя на входе и выходе из активной зоны от времени для режима «Потеря системного электроснабжения реактора» для РУ БН-1200, полученные по коду ЕВКЛИД





Расчетная схема РУ БН-1200

Расчетный код СОКРАТ-БН для реакторов на быстрых нейтронах

Интегральный код СОКРАТ-БН разработан в ИБРАЭ РАН совместно с АО «ОКБМ Африкантов», АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ». Он представляет собой взаимосвязанную систему программных модулей на платформе расчетного кода СОКРАТ и предназначен для анализа безопасности РУ с натриевым теплоносителем (БН-600, БН-800, БН-1200, МБИР). В настоящее время разработано две версии кода. Первая версия кода СОКРАТ-БН/В1 предназначена для моделирования проектных и запроектных аварий, включая режимы с кипением теплоносителя, до начала плавления активной зоны. В состав первой версии вошли программные модули, позволяющие описывать теплогидравлические процессы для натрия и воды, термомеханические процессы для оксидного топлива и стальной оболочки, нейтронно-физические процессы в точечном приближении и процессы транспорта продуктов деления и коррозии в корпусе реактора, включая газовую полость.

Группа разработчиков кода Сократ-БН:
Чалый Р. В., Рыжов Н. И., Фокин А. Л.





Сотрудники ИБРАЭ РАН и ИВМ РАН, разработчики расчетного кода GeRa. Слева направо: Григорьев Ф. В., к.ф.-м.н. Новиков К. А., Трофимов А. А., к.ф.-м.н. Никитин К. Д., Крамаренко В. К., к.ф.-м.н. Капырин И. В., Сускин В. В., к.ф.-м.н. Пленкин А. В., к.ф.-м.н. Копытов Г. В., д.ф.-м. н. и чл.-кор. РАН Василевский Ю. В.

Первая версия кода была аттестована в Ростехнадзоре в 2016 году. В область моделирования второй версия кода СОКРАТ-БН/В2 включены тяжелые аварии с плавлением активной зоны реактора. В ее состав дополнительно включены модули, позволяющие описывать накопление продуктов деления в топливе, нейтронно-физические процессы в диффузионном приближении, процессы плавления и перемещения активной зоны. Разработаны и протестированы интерфейсы для совместной работы с кодами, позволяющими моделировать процессы переноса продуктов деления в помещениях АЭС и окружающей среде. Вторая версия была передана на экспертизу в Ростехнадзор в 2017 году.

Обе версии кода внедрены в промышленную эксплуатацию и активно используются для обоснования безопасности как действующих РУ (БН-600, БН-800), так и проектируемых РУ. Начиная с 2013 года, выполняются работы по расчетному анализу безопасности в рамках разработки технического проекта РУ БН-1200. В 2016 году кодом СОКРАТ-БН был выполнен комплексный расчетный анализ начальной стадии аварии с разрушением активной зоны реактора. Получены данные по изменению мощности реактора для аварии с неконтролируемым извлечением стержней аварийной защиты (СУЗ) в условиях кипения натриевого теплоносителя и перемещения расплавленных компонентов активной зоны реактора.

Программный комплекс GeRa для обоснования безопасности пунктов захоронения РАО

Развитие перспективных реакторных технологий следует увязывать с долгосрочными планами по захоронению радиоактивных отходов. Необходимость оптимизации ядерного топливного цикла (ЯТЦ) по критерию минимизации активности образующихся РАО может означать не только переоценку различных топливных циклов, но и введение дополнительных требований к рабочим характеристикам и направлениям развития ядерных реакторов на «тепловых» и быстрых нейтронах, к технологиям переработки ОЯТ, и т. д.

Современный подход к обращению с радиоактивными и токсичными отходами предполагает проведение тщательного системного анализа безопасности технологий и объектов захоронения РАО. Вычислительную базу такого анализа составляют компьютерные коды, построенные на основе физических моделей процессов фильтрации и переноса радиоактивных веществ в геологических средах. Для моделирования процессов миграции радионуклидов в подземных водах ИБРАЭ РАН совместно с ИВМ РАН разрабатывается программный комплекс нового поколения GeRa, реализующий высокоэффективные численные методы дискретизации, построения адаптивных расчетных сеток, решения линейных и нелинейных систем.



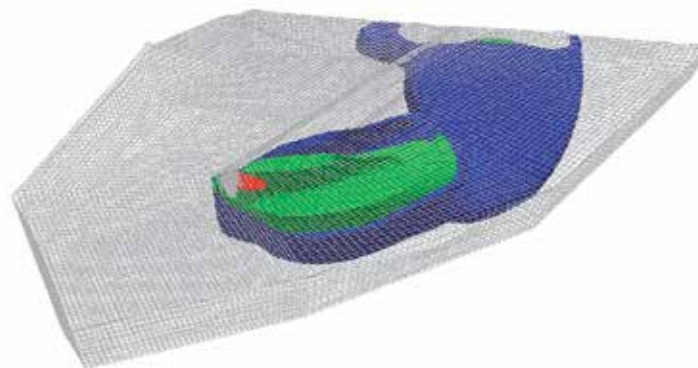
Программный комплекс оптимизирован для решения ресурсоемких задач на современных суперкомпьютерах с параллельной организацией. Он ориентирован на «мультифизичное» моделирование с возможностью учета процессов фильтрации и многокомпонентного переноса примеси в однородных и двупористых средах, радиоактивного распада, конвекции и теплопереноса, химических взаимодействий в системе вода-порода, взаимодействия грунтовых и поверхностных вод.

Программный комплекс GeRa используется при обосновании безопасности объектов замкнутого ЯТЦ и окончательной изоляции РАО различного уровня активности. Функциональные возможности комплекса планомерно будут расширяться для учета геомеханических, биологических и других процессов, способных повлиять на безопасность захоронения РАО.

Расчетный код Сибилла для расчета облучения по водяным путям

Код Сибилла, разработанный ИБРАЭ РАН, был аттестован Ростехнадзором в 2016-м году. Он предназначен для расчета активностей радионуклидов в воде и донных отложениях водных объектов, а также для расчета дозы облучения населения, формируемой за счет хозяйственного использования водных объектов, включая питьевое водоснабжение.

13-й семинар «Разработка расчетного кода GeRa для гидрогеологического моделирования»



Результаты прогнозного расчета по коду GeRa миграции загрязнения в грунтовых водах от пункта приповерхностного захоронения РАО



Код может применяться для водных объектов, испытывающих воздействие объектов использования атомной энергии (ОИАЭ), как при их нормальной эксплуатации, так и при возникновении аварий, включая поступление радионуклидов с организованными сбросами, несанкционированными протечками, выпадениями из атмосферы, в результате смыва с загрязненных водосборов, а также поступления радиоактивных веществ с водами от загрязненных притоков.

Код Сибилла может быть использован на всех стадиях «жизненного цикла» ОИАЭ для обоснования экологической безопасности, включая: предпроектные и проектные стадии, строительство, эксплуатацию и вывод из эксплуатации ОИАЭ. Возможно использование кода для поддержки принятия решений по противоаварийным мерам в случае возникновения аварийных ситуаций на объектах использования атомной энергии, в том числе по ограничению водопользования.

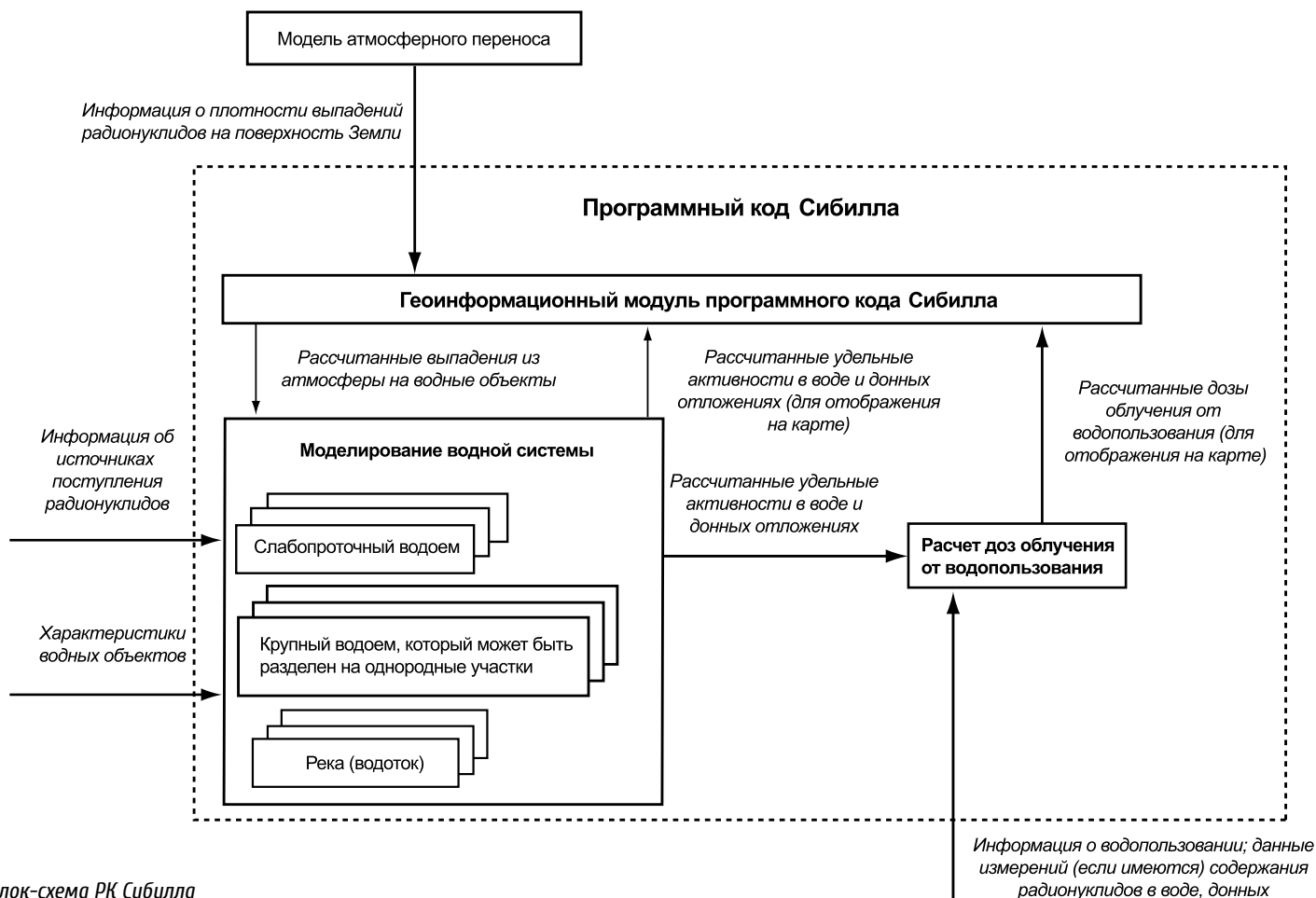
Код может также использоваться для расчета содержания радиоактивных веществ в реках, однородных водоемах и водохранилищах, а также в крупных водоемах и водохранилищах, которые могут быть разделены на однородные участки.

Верификация кода Сибилла была осуществлена путем сравнения результатов расчета с данными измерений на трех реках, одном водохранилище и четырех озерах, а также путем аналитических тестов и сравнения результатов расчетов с зарубежными моделями.

*Разработчики кода Сибилла. Слева направо:
к.ф.-м.н. Киселев В. П., к.т.н. Казаков С. В.,
д.т.н. Уткин С. С., д.ф.-м.н. Носов А. В.
к.ф.-м.н. Крылов А. Л., д.ф.-м.н. Семенов В. Н.*

*Учебные пособия второй Школы-семинара
по обучению кодам нового поколения
Сибилла, РОМ, РОУЗ, ОДЕТТА, CONV-3D*





Блок-схема ПК Сибилла

Программное средство РОМ для оценки радиационной обстановки при атмосферном переносе

Компьютерная система РОМ предназначена для оценки радиационной обстановки при выбросах радиоактивных веществ в аэрозольной и/или газовой форме на АЭС и других объектах использования атомной энергии в аварийных режимах и при нормальной эксплуатации. Система может использоваться для анализа и обоснования безопасности ОИАЭ, а также для поддержки принятия решений в реальном времени на начальной, острой фазе радиационной аварии.

ПС РОМ является развитием аттестованного кода НОСТРАДАМУС. В нем реализована лагранжева траекторная стохастическая модель атмосферного переноса, основанная на решении уравнения турбулентной диффузии методом статистических испытаний (Монте-Карло); для сглаживания результатов расчета

разработана гибридная методика «блуждающих облаков», в которой каждая пробная точка представляется как облако конечных размеров с гауссовым распределением концентрации. Кроме того, код содержит модель пограничного слоя атмосферы для восстановления вертикальных профилей метеорологических параметров по данным измерений на приземном уровне, а также методику для определения категории стабильности атмосферы по синоптическим признакам. Лагранжева методика позволяет учитывать влияние рельефа местности, нестационарности метеоусловий, локальных осадков.

ПС РОМ позволяет рассчитывать:

- как мгновенные значения приземной объемной активности радионуклидов в аэрозольной и/или газовой форме, так и поверхностную активность радионуклидов (плотность выпадений) для каждого радионуклида;
- мощности дозы и дозы облучения от каждого радио-

нуклида на органы и ткани с учетом возрастных групп населения и с учетом разных путей облучения.

Дополнительно к коду НОСТРАДАМУС код РОМ рассчитывает:

- параметры радиационной обстановки при кратковременных выбросах с автоматическим выбором неблагоприятных метеоусловий и при продолжительных выбросах с учетом реальных метеорологических данных временных рядов;
- среднегодовые дозы облучения населения вокруг ОИАЭ при нормальной эксплуатации с использованием тех же реальных метеорологических данных.
- скорость гравитационного осаждения аэрозолей продуктов горения натрия.

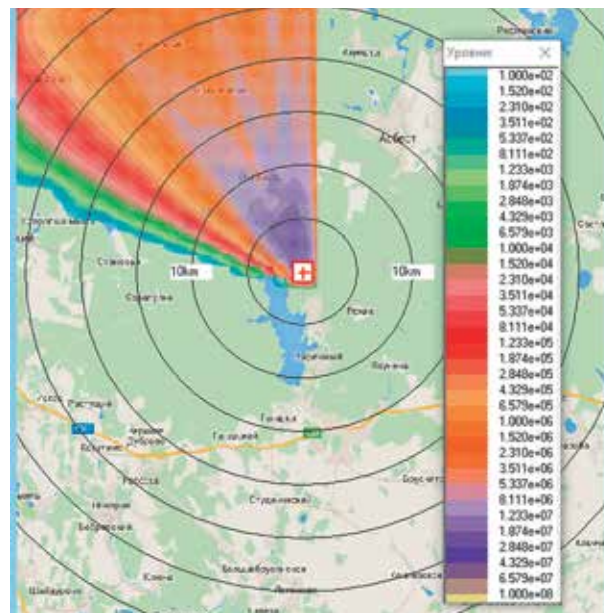
Трехмерный код РОУЗ для оценки радиационной обстановки на промплощадке

Программное средство (ПС) РОУЗ предназначено для оценки радиационной обстановки на промплощадке АЭС или других ОИАЭ при атмосферных выбросах радиоактивных веществ с учетом влияния промышленной застройки (реальной трехмерной геометрии объекта). ПС может также использоваться для оценок радиационной или токсикологической обстановки при выбросах радиоактивных или токсичных веществ в городской застройке.

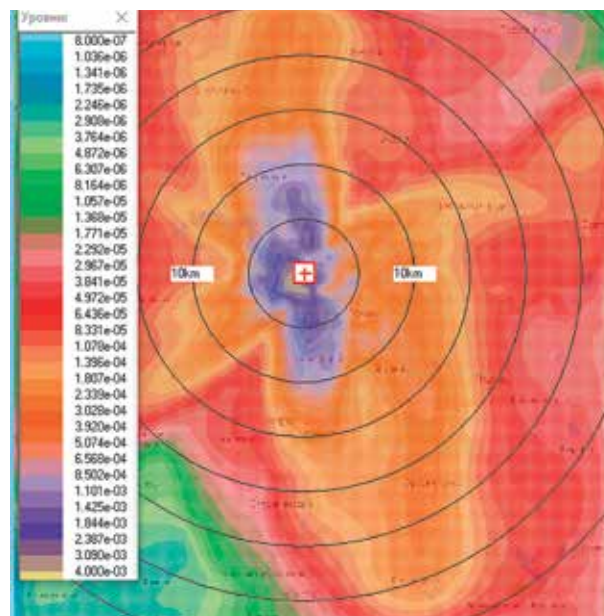
Базовые компоненты ПС РОУЗ включают модуль расчета трехмерного поля скорости ветра на основе решения уравнений Навье–Стокса в Рейнольдсовом приближении, модуль расчета атмосферной турбулентной адвекции-диффузии примесей в газовой и аэрозольной форме, модуль расчета доз от произвольного облака и загрязненной поверхности. Блок расчета трехмерного поля ветра с учетом влияния городской застройки использует модифицированную версию прецизионной LES модели CONV-3D. Для моделирования атмосферного переноса радионуклидов в условиях промышленной застройки используются специальные трехмерные цифровые модели объекта, отображающие габариты зданий и сооружений и относительные расстояния между ними.

ПС РОУЗ обеспечивает расчет следующих параметров:

- мгновенных значений объемных концентраций каждого радионуклида;
- мгновенных значений поверхностных концентраций каждого радионуклида;



Окно визуализации выпадений всех радионуклидов источника в аэрозольной форме, код РОМ



Окно визуализации пищевой дозы, код РОМ



Разработчики кодов РОМ и РОУЗ.
Слева направо: д.ф.-м.н. Семенов В. Н.,
Дзама Д. В., д.ф.-м.н. Сорокикова О. С.

- мощности дозы и дозы облучения персонала от всех радионуклидов, присутствующих в источнике выброса, на разные органы, с учетом возрастных групп и по разным путям облучения.

Верификация кода РОУЗ была проведена в соответствии с международными требованиями к моделям класса МММ (Microscale Meteorological Model) с учетом рекомендаций по выбору верификационных экспериментов.

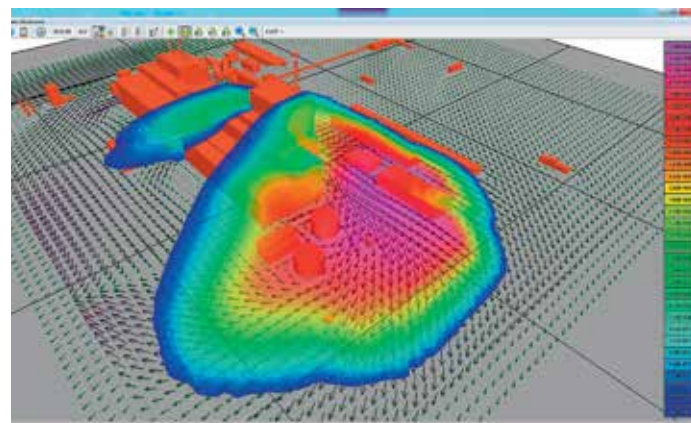
Нейтронно-физический код ODETTA

Программное средство (ПС) ODETTA, разработанное ИБРАЭ РАН в сотрудничестве с ИПМ им. М. В. Келдыша РАН, предназначено для численного моделирования нейтронно-физических процессов в защитных композициях реакторных установок на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем в режимах нормальной эксплуатации. Оно может применяться при расчетах радиационных условий эксплуатации элементов конструкции и оборудования объектов использования атомной энергии (ОИАЭ), являющихся источниками и/или находящихся под воздействием ионизирующих излучений при обосновании безопасности ОИАЭ.

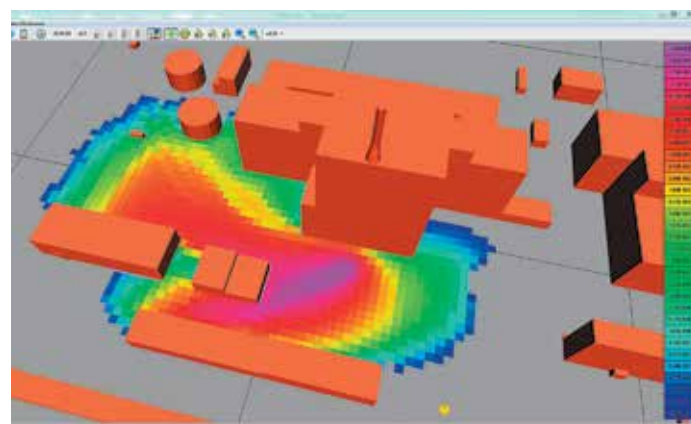
ПС основано на методе дискретных ординат и разрывном линейном методе конечных элементов на неструктурированных тетраэдральных сетках. Реализован интерфейс параллельных вычислений OpenMP.

а) пример расчета интегральной дозы от ингаляции на промплощадке Белярской АЭС с использованием симулятора ПС РОУЗ

б) проекция поля скорости ветра на плоскость $Z = 5$ и изоповерхности мгновенной концентрации ^{137}Cs на момент времени 60 с. Расчет выполнен с использованием симулятора ПС РОУЗ



а)



б)

ПС обеспечивает расчет пространственно-энергетического распределения плотности потока нейтронов и гамма-квантов и их функционалов путем решения стационарной неоднородной задачи переноса с фиксированным источником в многогрупповом приближении.

Расчетный код ODETTA работает с отечественным константным обеспечением CONSYST/БНАБ-РФ (АО «ГНЦ РФ-ФЭИ»).

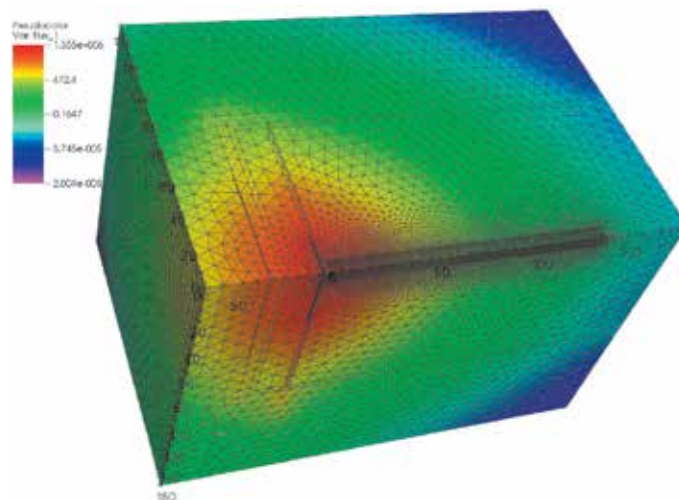
Расчетный код ODETTA верифицирован и прошел опытную эксплуатацию в АО «ОКБМ Африкантов». В настоящее время проводится процедура аттестации.

На рисунке представлено пространственное распределение полного потока нейтронов, полученное по коду ODETTA, для эксперимента Winfrith Graphite на установке ASPIS, входящего в сборник бенчмарков SINBAD.

Экспериментальные исследования

Необходимым условием успешной разработки моделей и аттестации кодов нового поколения является наличие экспериментальных данных. В случае их недостаточности, необходимо проведение экспериментальных исследований, в том числе, позволяющих получать данные не только об осредненных, но и локальных характеристиках потока.

Специалисты ИБРАЭ РАН совместно с ИТ СО РАН им. С. С. Кутателадзе (г. Новосибирск) выполнили хорошо инструментированные эксперименты с целью верификации расчетных кодов, в том числе CFD, и обоснования проектных решений элементов реакторных установок с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем (ТЖМТ). Проведены экспериментальные исследования теплообмена и гидродинамики при течении жидкостей с существенно различными числами Прандтля, моделирующие течения реальных теплоносителей в элементах реакторных установок. Выполнены экспериментальные исследования по развитию свободной конвекции, проведено уточнение теплофизических свойств свинца в области высоких температур. При измерении осредненных и пульсационных характеристик полей температуры и скорости использовались оригинальные подходы к выполнению цифровой видеосъемки, использованию тепловизионной аппаратуры, микротермопарному зондированию распределения температуры в ТЖМТ.



Пространственное распределение полного потока нейтронов, полученное по коду ODETTA, для эксперимента Winfrith Graphite (изображена симметричная ¼ часть модели)



Разработчики кода ODETTA. Слева направо, сидят: д.т.н. Селезнев Е. Ф., к.т.н. Чернова И. С. Стоят: Белов А. А., к.т.н. Березнев В. П.

Выполнены комплексные экспериментальные исследования течения модельного ТЖМТ в 7-стержневой модели-имитаторе ТВС с дистанционирующими решетками, максимально приближенной к геометрии ТВС РУ БРЕСТ-ОД-300:

- проведено экспериментальное исследование неоднородности распределения температуры по поперечному сечению 7-стержневой модели-имитатора ТВС при тепловыделении только на одном имитаторе твэла;
- проведены исследования эволюции температурного поля на поверхности имитатора твэла при нагреве соседнего имитатора твэла для нескольких конфигураций взаимного расположения нагреваемого и измерительного имитаторов твэлов и дистанционирующей решетки;
- получены данные о неравномерности аксиального и осевого распределения температуры по поверхности стенки имитаторов твэла;
- исследовано влияние дистанционирующей решетки на распределение температурного поля на поверхности имитатора твэла.

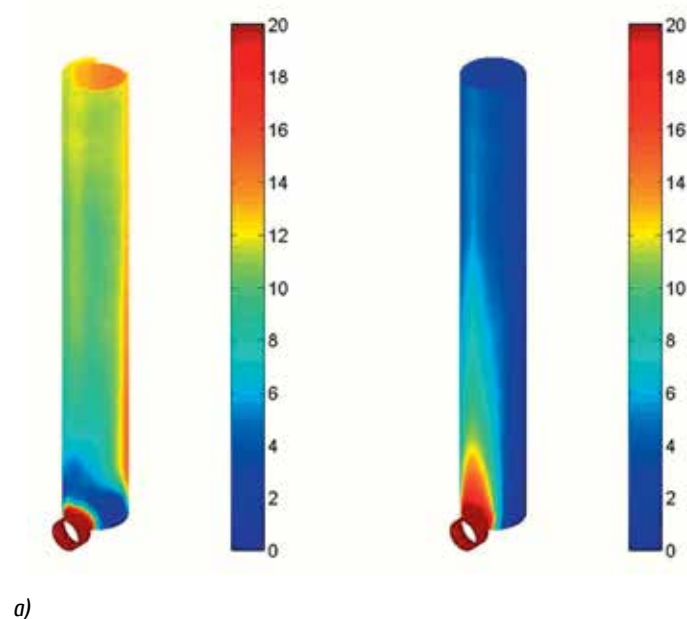
Проведены экспериментальные исследования по определению закономерностей смешения двух разнотемпературных потоков модельного ТЖМТ в Т-образном соединении:

- получены детальные распределения температуры по поверхности стенки канала при смешении двух потоков модельного жидкометаллического теплоносителя различной температуры;

- получены данные по распределению осредненных и пульсационных значений температуры в потоке теплоносителя в области смешения;
- исследовано влияние на процесс смешения расходов холодного и горячего потоков жидкости;
- выполнены измерения временной эволюции температур и их пульсаций на поверхности Т-образного соединения и внутри жидкости в период времени от начала контакта вплоть до установления теплового равновесия в зоне Т-образного соединения.

Осуществлен эксперимент по определению закономерности распределения температуры при течении модельного ТЖМТ в кольцевом канале с частичным перекрытием его поперечного сечения плоской преградой (заслонкой), затеняющей 1/4 сечения кольцевого канала. Проведены измерения временной эволюции температур и их пульсаций на внешней поверхности кольцевого канала в месте взаимодействия течения теплоносителя с преградой.

Выполнен цикл экспериментальных работ по изучению межфазного взаимодействия газ — модельный ТЖМТ, в котором наиболее отчетливо выражается импульсное взаимодействие газа с теплоносителем, приводящее к возникновению динамических процессов, связанных с колебаниями давления и уровня теплоносителя. Получены детальные данные, включающие в себя профили пульсаций давления, изменения уровня модельного ТЖМТ и температуры.



а)



б)

а) Пример 3D распределения температуры на поверхности Т-образного смесителя. Отношения расходов горячего и холодного теплоносителя 0,63 (слева); 0,07 (справа)

б) Распределение температуры на поверхности имитатора твэла в 7-стержневой модели — имитаторе ТВС при перегреве одного из твэлов. Нагреваемый твэл выделен розовым цветом, область нагрева находится снизу рисунка и не показана на рисунке



Проведено комплексное экспериментальное исследование процесса истечения инертного газа в ТЖМТ с определением параметров формирующихся пузырей газа. Применение оригинальных методик измерений позволило определить параметры пузырей инертного газа в ТЖМТ (размер, частоту отрыва, отрывной диаметр, скорость подъема).

Выполнено исследование закономерностей теплообмена между инертным газом и ТЖМТ при различных режимах истечения (пузырьковый, снарядный режимы) газа в ТЖМТ (расплав свинца, сплав Розе), находящегося в вертикальном адиабатическом канале. Выполнены также измерения эволюции температуры ТЖМТ при длительном истечении в него инертного газа и получены данные по условиям захлаживания ТЖМТ.

Одним из основных результатов работ является определение закономерностей течения ТЖМТ, в которых наиболее отчетливо выражается трехмерная структура течения. Получена обширная база экспериментальных данных, включающая в себя распределение локальных осредненных и пульсационных характеристик течения, в том числе спектральных характеристик скорости и температуры, данных по локальному и интегральному теплообмену. Полученные результаты хорошо применимы в качестве бенчмарков для верификации CFD кодов, используемых при гидродинамических расчетах реакторных установок в неизотермических режимах течения теплоносителя.

Семинар по теме «Результаты экспериментальных исследований, проведенных в рамках проекта «Коды нового поколения» с целью получения информации для верификации CFD кодов. Состояние разработки Системной оболочки в рамках проекта «Коды нового поколения». С докладом выступает директор Новосибирского филиала ИБРАЭ РАН д.т.н. Прибатурин Н. А.

Вручение Большову Л. А. диплома «Добросовестный поставщик атомной отрасли»



Разработка методов и анализ безопасности объектов использования атомной энергии на завершающих стадиях жизненного цикла



Институт в течение многих лет тесно и плодотворно сотрудничает с Госкорпорацией «Росатом» и ее проектно-конструкторскими организациями, академическими и ведомственными научными институтами разного профиля, а также с органами государственной власти всех уровней. Результатом такого сотрудничества является решение задач стратегического планирования в сфере обеспечения безопасности объектов использования атомной энергии, в том числе на завершающих стадиях жизненного цикла; информационно-аналитическая поддержка комплексного решения проблем ядерной и радиационной безопасности (ЯРБ); разработка эффективных методик и инструментов оценки долгосрочных рисков, участие в разработке и реализации федеральных целевых программ в сфере ЯРБ.



К приоритетным направлениям деятельности в данной области относятся:

- обоснование и реализация мероприятий по информационно-аналитической, организационной и нормативно-правовой поддержке комплексного решения проблем ЯРБ;
- активное участие в разработке и реализации ФЦП ЯРБ;
- теоретические и прикладные исследования, направленные на разработку эффективных методик и инструментов оценки долгосрочных рисков, средств анализа безопасности объектов наследия и обоснования решений по завершающим стадиям ядерного жизненного цикла;
- развитие современной методологии стратегического планирования и проектного управления в области радиационной безопасности объектов ядерного наследия и предотвращения радиоэкологических угроз, связанных с миграцией радионуклидов в морской среде;
- участие в разработке и реализации крупномасштабных международных программ, направленных на решение проблем экологической реабилитации Арктического региона, в том числе обусловленных необходимостью комплексной утилизации выведенных из состава ВМФ объектов атомного флота на Северо-Западе и Дальнем Востоке России;
- стратегическое планирование мероприятий по обеспечению долговременной безопасности Теченского каскада водоемов;
- разработка и участие в реализации стратегического Мастер-плана исследований в обоснование безопасности сооружения, эксплуатации и закрытия пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов в Нижнеканском массиве горных пород.



Линке Игорь Иннокентьевич

д.т.н., заместитель директора ИБРАЭ РАН
по информационно-аналитической поддержке
комплексных проблем ЯРБ

«С момента создания Института одно из важных направлений работы было связано с чернобыльской тематикой и ориентировано в основном на поддержку союзных, а затем федеральных органов управления работами по преодолению последствий аварии. Понимание задач и условий работы органов управления, умение работать с большими массивами данных и наличие компетенций международного уровня по широкому спектру научных задач стало отличительной чертой деятельности Института.

В качестве одного из примеров выполненных работ могу назвать такой крупный и не имеющий аналогов в мире объект, как Теченский каскад водоемов, где эффективно применяются созданные в ИБРАЭ РАН расчетные средства анализа безопасности — аттестованные расчетные комплексы GeRa, ГЕОПОЛИС и др. Успешное решение задач такого масштаба требует объединения усилий специалистов, представляющих различные подразделения Института. Организация их слаженного и эффективного взаимодействия является одним из наиболее значимых результатов нашей 30-летней работы».

ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ ПОДДЕРЖКА КОМПЛЕКСНОГО РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМ ЯДЕРНОЙ И РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Территории, загрязненные в результате аварий на ЧАЭС и на Южном Урале, отдельные потенциально опасные ядерные объекты, Теченский каскад водоемов, ПО «Маяк», бывшие береговые базы ВМФ, все предприятия атомной отрасли — таково поэтапное расширение географии работ ИБРАЭ РАН за 30 лет его деятельности. Тематический спектр исследований также постоянно расширялся и в настоящее время рационально сконцентрирован в рамках двух отделений Института. Первое занимается комплексным сопровождением федеральной целевой программы обеспечения ядерной и радиационной безопасности и поддержкой современных преобразований в сфере завершающих стадий ядерного топливного цикла. В другом отделении разрабатываются методология и средства анализа и оценки безопасности объектов наследия и готовятся научные обоснования решений по завершающим стадиям ядерного жизненного цикла.

Направления исследований и стратегии развития

- **КОМПЛЕКСНОЕ** (информационно-аналитическое, организационно-нормативное) сопровождение Федеральной целевой программы обеспечения ядерной и радиационной безопасности (ФЦП ЯРБ) и иных преобразований в сфере завершающих стадий ядерного топливного цикла.

Стратегия развития: ориентирована на совершенствование научно-технической поддержки мероприятий по обеспечению безопасности объектов ядерного наследия. В перспективе речь идет о выходе на тотальное проектное управление с рассмотрением множества вариантов конечных состояний и выбором наилучшего из этих вариантов.

- **РАЗРАБОТКА МЕТОДОЛОГИИ И СРЕДСТВ АНАЛИЗА И ОЦЕНКИ** безопасности объектов наследия и обоснования решений по завершающим стадиям ядерного жизненного цикла.

Стратегия развития: максимальное «вооружение» проектных и эксплуатирующих организаций современными расчетными средствами; сосредоточение научных сил на решении задач по дальнейшему расширению сферы применения этих расчетно-аналитических средств; постоянное наращивание «человеческого капитала», привлечение и поддержка научной молодежи.

Развитие современной системы обращения с РАО представляется критически важным для долгосрочного развития атомной энергетики и промышленности России. Также актуальны задачи решения проблем ядерного наследия.

Работы Института по тематике РАО, выполняемые в соответствии с госзаданием, имеют системный характер и нацелены на оптимизацию национальной системы обращения с РАО по критериям безопасности для нынешнего и будущего поколений.

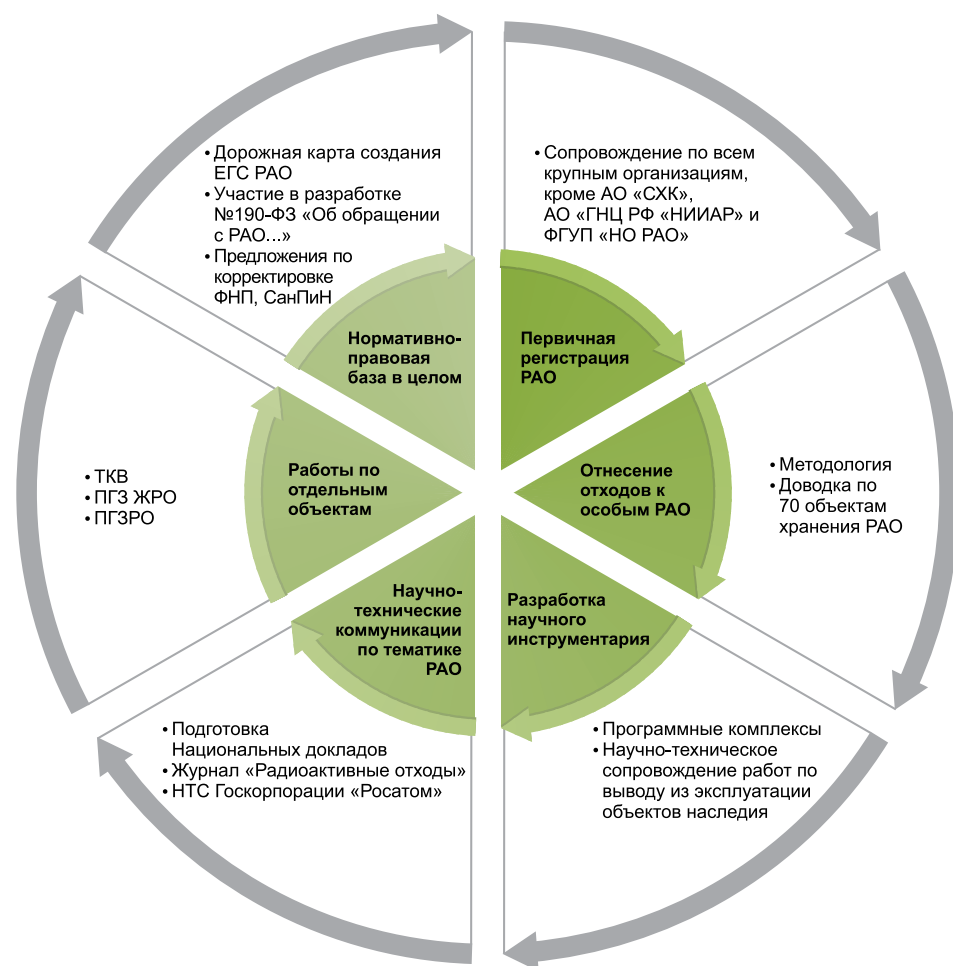
На начало 2018 года средний возраст научных сотрудников двух отделений составил 41,8 лет; средний возраст молодых специалистов – 27,4 лет. В 2013–2017 гг. сотрудники отделений защитили 4 кандидатских и 2 докторские диссертации.

В Отделениях работают специалисты в разных областях науки, среди них обладатели ученых степеней по физико-ма-

тематическим, техническим, экономическим, геологическим, химическим наукам. Мультидисциплинарность проводимых исследований выражается также в тематическом разнообразии научных публикаций.

Максимальное количество опубликованных в 2013–2017 гг. научных работ относится к тематике обращения с РАО. Эти публикации оказались за рамками традиционного ВАКовского перечня рецензируемых журналов, поскольку в России не было научных журналов по этому направлению. С 2017 года ИБРАЭ РАН издает рецензируемый научно-технический журнал «Радиоактивные отходы».

Деятельность Института характеризуется высокой интенсивностью взаимодействия с российскими научными организациями и предприятиями атомной энергетики и промышленности. Специалисты отделений побывали почти на всех



Трехтомное издание «Проблемы ядерного наследия и пути их решения» под общей редакцией Большова Л. А., Лаверова Н. П., Линге И. И., 2012–2015 гг.



Двухтомное издание «Лучшие зарубежные практики вывода из эксплуатации ядерных установок и реабилитации загрязненных территорий» под общей редакцией Линге И. И., Абрамова А. А., 2017 г.



крупных промышленных предприятий атомной отрасли России и в большинстве крупных научных центров мира.

География командировок сотрудников отделений в 2013–2017 гг.

Ежегодно ИБРАЭ РАН организует 5–8 значимых научно-технических мероприятий по тематике наших отделений; на регулярной основе проводятся заседания НТС № 10 Госкорпорации «Росатом» и его секций.

За минувшие 5 лет среди наиболее масштабных мероприятий с участием ИБРАЭ РАН необходимо отметить X Юбилейную российскую научную конференцию по радиационной безопасности, проходившую в сентябре 2015 года. В конференции приняли участие 450 специалистов, в том числе 13 членов РАН, 41 доктор наук и 55 кандидатов наук. На конференции были представлены 22 пленарных и более 200 секционных и стендовых докладов.

Пленарное заседание X Юбилейной российской научной конференции, Президиум РАН

О востребованности и конкурентоспособности проводимых в отделениях научных исследований говорит большое число заказчиков, из которых наиболее крупным является Госкорпорация «Росатом». Отделения также работают по заказам Минприроды России, Концерна «Росэнергоатом», ФГУП «ГХК», ФБУ «НТЦ ЯРБ», АНО ИЦАО, Министерства общественной безопасности Челябинской области, ФГУП «НО РАО», ФГУП «Гидроспецгеологии», ФГУП «ПО «Маяк», ДВФУ.

В тех случаях, когда выполняемые НИР и НИОКР могут иметь широкий общественный резонанс, по приглашению заказчиков наши ведущие специалисты представляют на публич-





ных мероприятиях результаты научных исследований, включая экспертную оценку воздействия на окружающую среду и население объектов использования атомной энергии (хранилищ, блоков АЭС, пунктов захоронения).

В качестве соисполнителей к работам отделений привлекаются авторитетные научные организации, включая ИВМ РАН, ВНИИРАЭ, НПО Тайфун, РЭУ им. Г. В. Плеханова, ГНЦ ФМБЦ им. А. И. Бурназяна, а также компании, работающие на базе новых информационных платформ, например, НЕОЛАНТ, или в экономическом консалтинге мирового уровня — The Boston Consulting Group.

Участие сотрудников отделений в мероприятиях по работе с общественностью на территории РФ

Национальные доклады и отраслевые отчеты

Одно из важных направлений деятельности отделений — подготовка и выпуск национальных докладов и отраслевых отчетов.

Национальные доклады по Чернобылю

Первым в ряду подобных документов был Национальный доклад Российской Федерации к 10-летию катастрофы на Чернобыльской АЭС. Заглавная роль ИБРАЭ при подготовке первого отчета была обусловлена реальным опытом интеграционной работы в этой области. В дальнейшем Институт постоянно подтверждал свою ведущую роль и готовил подобные доклады в 2001, 2006, 2011 и 2016 годах. Националь-

Симпозиум «30 лет аварии на Чернобыльской АЭС: анализ, уроки, выводы на будущее», апрель 2016 года





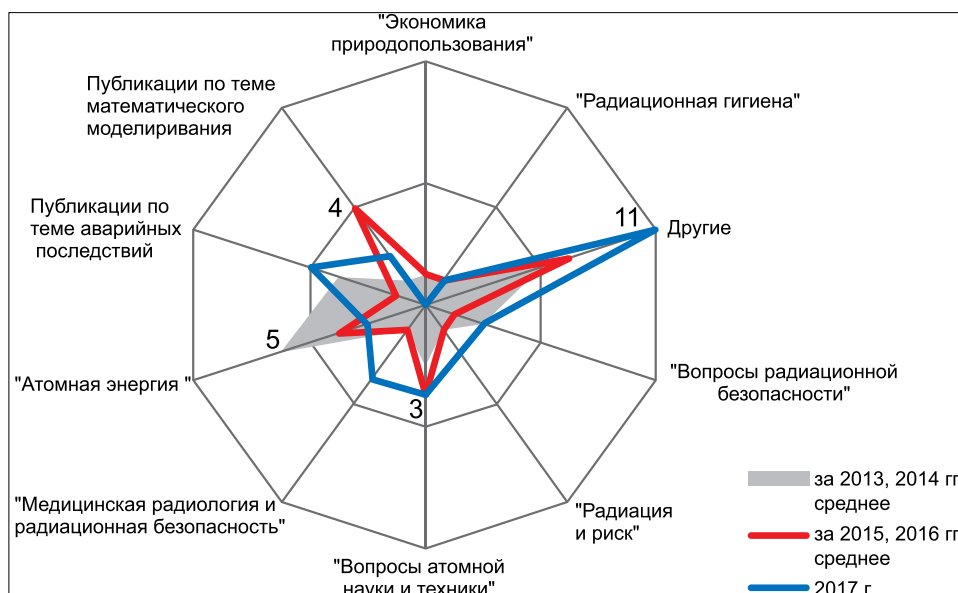
Национальный доклад к 30-летней годовщине чернобыльской аварии



Отчет по безопасности ГК «Росатом» 2015 г.



Четвертый национальный доклад Российской Федерации «О выполнении обязательств, вытекающих из Объединенной конвенции о безопасности обращения с отработавшим топливом и о безопасности обращения с радиоактивными отходами»



Распределение публикаций сотрудников отделений в рецензируемых научных журналах

ные доклады представлялись на международных конференциях, проводимых под эгидой МАГАТЭ и ВОЗ, а с 2001 года — и на организованных Институтом регулярных симпозиумах в Президиуме РАН.

Отраслевые отчеты по безопасности

В 2001 году по инициативе ИБРАЭ РАН, поддержанной руководством Минатома России, был подготовлен первый доступный широкой общественности развернутый анализ состояния безопасности в атомной отрасли. Он вышел в свет в начале 2002 года под названием «Отраслевой отчет по безопасности». В дальнейшем такие публикации готовились ежегодно на протяжении 15 лет. В этой работе помимо ИБРАЭ участвовали несколько профильных подразделений Росатома. В 2015 году был опубликован последний выпуск отраслевого отчета. К этому времени наметилось некоторое снижение остроты восприятия общественностью тематики радиационной безопасности, кроме того, стал регулярно выходить в свет всеобъемлющий Публичный отчет Госкорпорации «Росатом».

Национальные доклады РФ о выполнении обязательств, вытекающих из Объединенной конвенции

В 2006 году ИБРАЭ РАН был привлечен Федеральным агентством по атомной энергии к подготовке первого Национального доклада Российской Федерации о выполнении обязательств, вытекающих из Объединенной Конвенции о безопасности обращения с ОЯТ и РАО. К настоящему времени подготовлены пять докладов. Пятый доклад был рассмотрен на 6-м совещании высоких договаривающихся сторон в мае 2018 года. Состав разработчиков Национального доклада оставался постоянным все эти годы. Это — специалисты ИБРАЭ РАН, НТЦ ЯРБ, Госкорпорации «Росатом» и Ростехнадзора. Первые доклады издавались и размещались в сети Интернет. В последующий период решения по опубликованию в сети принимались отдельно по каждому докладу.

Информационное обеспечение программ в сфере ЯРБ

Актуальность проблемы

В силу ряда исторических особенностей в нашей стране вплоть до середины 2000-х годов практически отсутствовал системный подход к заключительным стадиям ядерных технологий. Результатом этого стало накопление радиоактивных отходов, отработавшего ядерного топлива и остановленных объектов использования атомной энергии, не имевших ясных перспектив своей эволюции.

Ситуация стала принципиально меняться после старта Федеральной целевой программы «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2008 год и на период до 2015 года» (ФЦП ЯРБ-1). В результате ее реализации были решены наиболее критические проблемы, получен уникальный опыт осуществления ранее не проводившихся работ и созданы предпосылки для стратегического планирования завершения работ по ядерному наследию.

Институт активно способствовал этим кардинальным сдвигам. В начале 2000-х годов ИБРАЭ РАН готовил научное обоснование необходимости перехода к системному решению накопленных проблем и созданию организационно-экономических условий для предотвращения накопления проблем в будущем. В середине 2000-х годов ИБРАЭ РАН включился в разработку долгосрочных федеральных программ по ядерной и радиационной безопасности. С 2008 года и по настоящее время Институт является головной организацией по мониторингу реализации мероприятий и формированию государственной отчетности по федеральным целевым программам по ядерной и радиационной опасности (ФЦП ЯРБ-1 и ФЦП ЯРБ-2).

Содержание работ и их основные результаты

Разработка федеральных программ является сложным и многоэтапным процессом, в который вовлечены Госкорпорация «Росатом», государственные заказчики программ, ИБРАЭ РАН, предприятия и организации отрасли, ведомства — кураторы Программы (Минэкономразвития России, Минфин России, организации ВПК). Основные проблемы управления программой связаны с необходимостью подготовки решений в условиях значительной неопределенности ожидаемых результатов по мероприятиям и требованием точного распределения финансовых ресурсов на последующие периоды реализации. Это обуславливает постоянные корректировки программы и существенно увеличивает затраты на управление в связи с необходимостью пересмотра большого количества проектных решений. Например, за 8 лет реализации ФЦП ЯРБ-1 специалисты Института подготовили 10 корректировок Программы, без которых обеспечить достижение основной цели было бы невозможно. В рамках осуществления этих задач в Отделении разработан широкий класс моделей реализации мероприятий программ, их аттестации и верификации с целью последующего применения для оперативной и обоснованной оценки последствий принимаемых управленческих решений.

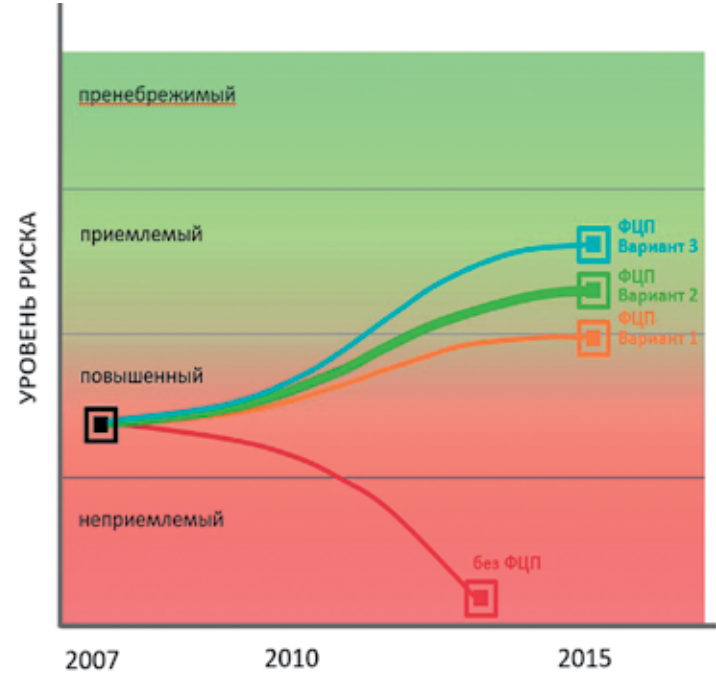


Иванов Артем Юрьевич

выпускник МФТИ, зав. отделением
информационного обеспечения программ
в сфере ЯРБ

«В последнее десятилетие специалисты отделения получили уникальный опыт разработки и сопровождения федеральных целевых программ по обеспечению ядерной и радиационной безопасности. В эти годы были разработаны концепции и проекты двух программ решения проблем «ядерного наследия» с периодами реализации 2008—2015 гг. (ФЦП ЯРБ-1) и 2016—2030 гг. (ФЦП ЯРБ-2).

На этапе их реализации мы осуществляли экспертную, информационно-методическую, нормативную и организационно-техническую поддержку принятия управленческих решений, а также информировали заинтересованные стороны о достигнутых результатах на официальных интернет-сайтах fcp-radbez.ru и fcп-яpb2030.рф».

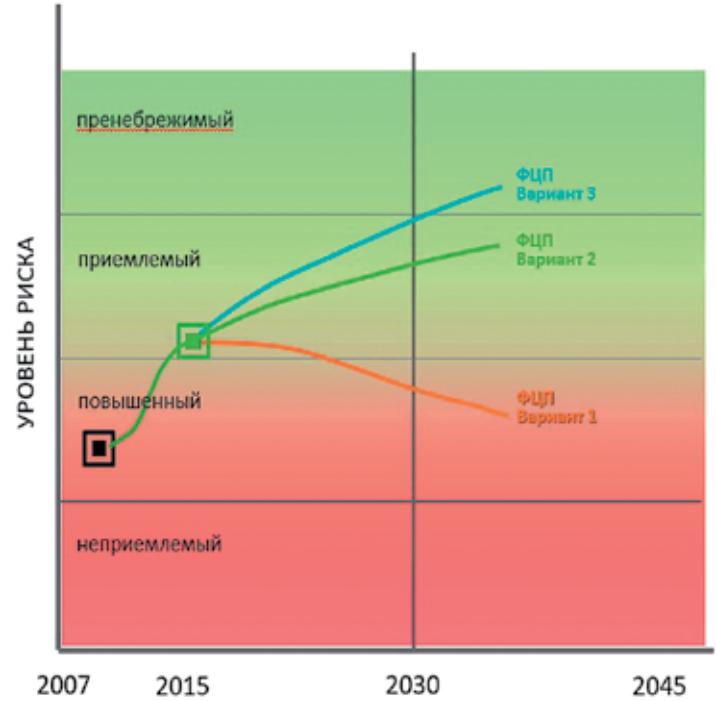


❌ Вариант 1 - Стратегия отложенных решений (60 млрд рублей)
Реализация неотложных мер по предотвращению возникновения аварий и аварийных ситуаций на ЯРОО.
Мощности по обращению с ОЯТ и РАО не создаются.
После 2015 года количество объектов, нуждающихся в выводе из эксплуатации в аварийных условиях, катастрофически нарастает.

✅ Вариант 2 – Стратегия обеспечения развития (145 млрд рублей)
Своевременное начало масштабных работ по объектам обращения с ОЯТ и РАО и выводу из эксплуатации позволяет удерживать уровни рисков на уровне приемлемых в период до и после 2015.

❌ Вариант 3 – Стратегия интенсивного решения накопленных проблем наследия (210 млрд рублей)
Ускоренное решение проблем ядерного наследия в условиях благоприятной для страны экономической конъюнктуры.

Разработка стратегий реализации ФЦП ЯРБ-1



Вариант 1 – Пессимистичный

Вариант 2 – Сценарий гарантированного решения проблем ядерного наследия

Вариант 3 – Стратегия интенсивного решения проблем ядерного наследия

	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
Плановое финансирование	128,8 млрд рублей	523,8 млрд рублей	1200,7 млрд рублей
Проблемы обращения с ОЯТ	Только безопасное хранение	Проблемы решены на 70%	Проблемы решены на 80%
Проблемы обращения с РАО	Только безопасное хранение	Проблемы решены на 20%	Проблемы решены на 50%
ВЭ ЯРОО	Не ведется	ВЭ 81 ЯРОО	ВЭ около 200 ЯРОО
Реабилитация территорий	Не ведется	Реабилитировано 50% РЗТ	Реабилитировано 100% РЗТ
Количество высокорисковых ЯРОО	Увеличение в 2-3 раза	Уменьшение в 2 раза	Уменьшение в 3-4 раза

Разработка стратегий реализации ФЦП ЯРБ-2



В ходе выполнения ФЦП ЯРБ-1 и реализации действующей ФЦП ЯРБ-2 специалисты отделения разработали систему мониторинга, в которой постоянно отслеживаются показатели исполнения государственных контрактов и договоров, параметры организационно-финансового плана, определяются целевые индикаторы и показатели программы в целом, а также текущие оценки результативности и эффективности. По результатам мониторинга система управления программой может оперативно реагировать на любые значимые факторы, выявлять и предлагать к распространению лучшие практики ведения работ, а также избегать «избыточных» и неэффективных мер.

Еще одним важным направлением деятельности отделения является **внедрение системы обеспечения качества** для всех выполненных работ.

В современных тенденциях развития и непрерывного внедрения инноваций одним из ключевых показателей эффективности организации, во многом определяющим ее статус, является конкурентоспособность, которая напрямую обусловлена качеством и востребованностью выполняемых работ. Поэтому процесс по внедрению системы обеспечения качества в отделениях и в ИБРАЭ РАН в целом находится под особым контролем у руководства Института, встречая должное понимание и заинтересованность сотрудников на всех уровнях.

Основной целью процесса внедрения и реализации системы качества является максимально возможное удовлетворение требований заказчика. Для достижения заявленной цели запланированы и регулярно осуществляются следующие меры по управлению качеством:

Сотрудники двух отделений Института: отделения анализа долгосрочных рисков в сфере обеспечения ЯРБ и отделения информационного обеспечения программ в сфере ЯРБ

Семинар по вопросам мониторинга ФЦП ЯРБ-2 в отделе разработки и информационно-аналитического сопровождения программ ЯРБ, слева направо: Кравченко О. Е., к.т.н. Ободинский А. Н., Дроздов В. В., Богданова О. А., Федьков А. А.





Дроздов Виталий Владимирович

выпускник МПГУ, руководитель группы анализа выполнения мероприятий программ, специализация: комплексный мониторинг реализации мероприятий ФЦП ЯРБ, работает в ИБРАЭ РАН с 2005 г.



Мамтиц Егор Геннадьевич

выпускник Государственного университета управления и МГИМО, м.н.с., специализация: мониторинг реализации мероприятий ФЦП ЯРБ, обеспечение качества работ, работает в ИБРАЭ РАН с 2013 г.



Ильясов Дамир Фатович

к.э.н., выпускник РЭУ им. Г. В. Плеханова, н.с., специализация: оценка экономической эффективности мероприятий ФЦП ЯРБ, работает в ИБРАЭ РАН с 2011 г.



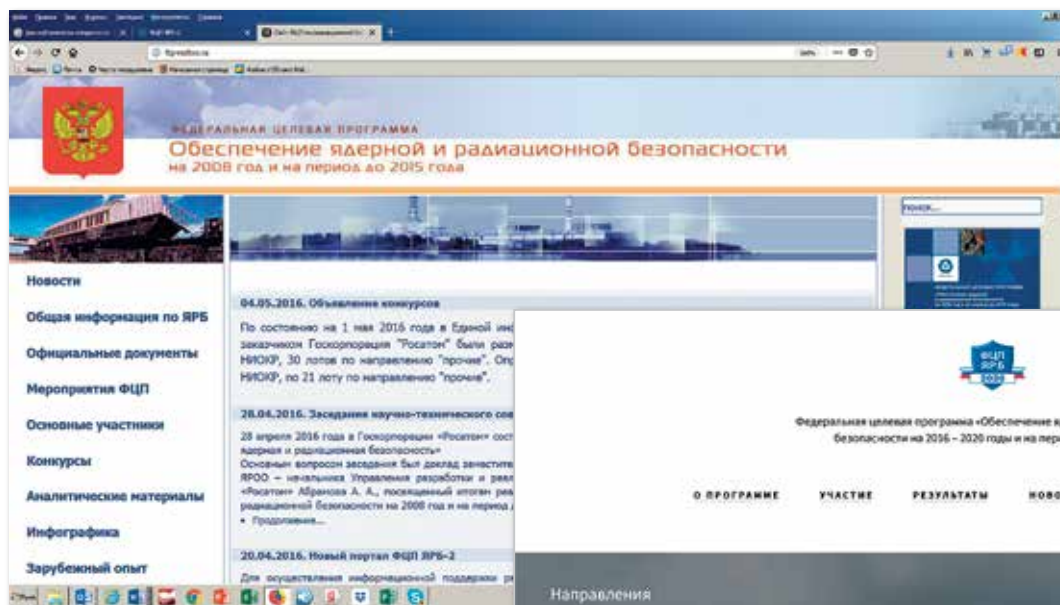
Семинар по вопросам повышения эффективности ФЦП ЯРБ-2, слева направо: к.т.н. Ведерникова М. В., Кузнецова Е. О., Овчинников И. Д., к.э.н. Ильясов Д. Ф., Будунова А. С., Иванов А. Ю., Казаков К. С.

- организация и обеспечение своевременного выполнения контрактных обязательств в полном объеме;
- контроль своевременного выполнения работ и достижения ключевых событий, предусмотренных сетевым графиком по контракту;
- организация процессов подготовки отчетной документации;
- организация процессов по получению разрешений на информационные материалы для их открытого опубликования, регистрации НИОКР в единой государственной системе учета, процедуре получения свидетельства о государственной регистрации результатов интеллектуальной деятельности (РИД).

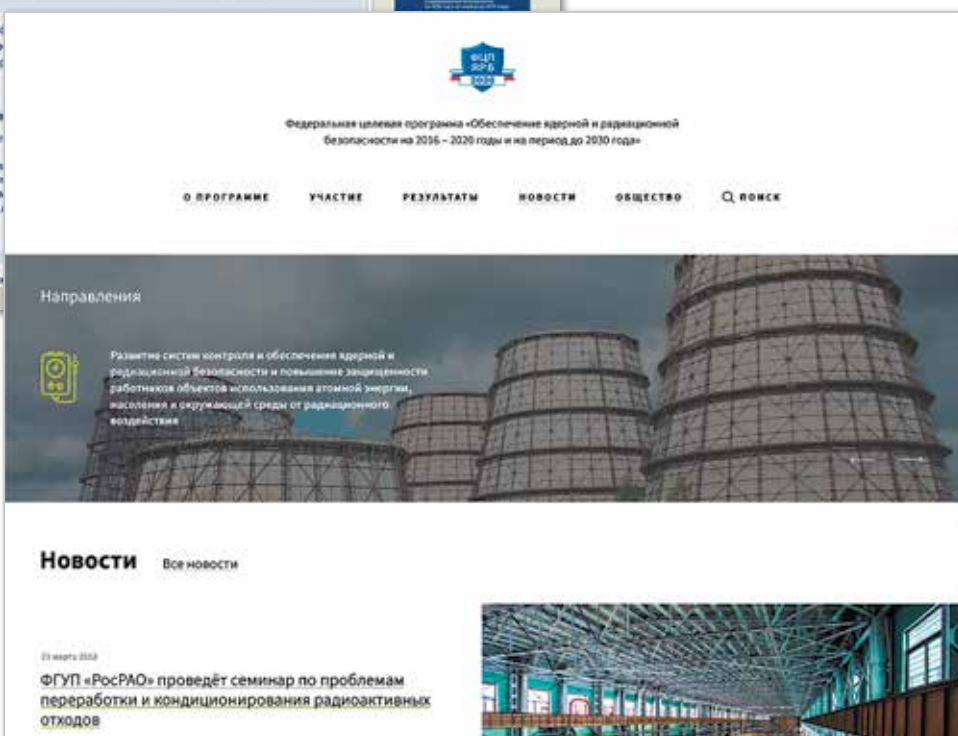
Решение проблем, связанных с выводом из эксплуатации объектов использования атомной энергии и обращением с федеральными РАО и ОЯТ, в последние годы является одним из приоритетных направлений развития атомной отрасли. К числу основных вопросов, требующих детальной проработки, относятся совершенствование технологических аспектов и планирование финансовых и экономических ресурсов, необходимых для эффективного решения задач обеспечения безопасности и вывода из эксплуатации. Результатом такого подхода в сфере применения новых практик является чрезвычайная востребованность специалистов, обладающих четким предметным пониманием особенностей различных ядерных установок и радиационных источников и навыками экономического анализа в условиях высокой степени неопределенности исходных данных. В связи с этим, в 2017 году в ИБРАЭ РАН был создан коллектив, объединяющий в себе энергичность молодых и перспективных специалистов и опыт профессионалов с многолетним стажем работы в области экономики. Их работа направлена на решение следующих чрезвычайно актуальных для атомной отрасли задач, связанных с проблемами ядерного наследия:

- разработку финансово-экономических моделей для планирования затрат на обращение с ЯРОО, ПХ РАО и ОЯТ;
- разработку стратегий по повышению эффективности поддержания ЯРОО в безопасном состоянии до момента их ликвидации;
- оценку эффективности мероприятий в области радиационной безопасности;
- стоимостную оценку затрат на выполнение различных видов работ, связанных с обеспечением радиационной безопасности;
- совершенствование научных концепций, подходов и методов для решения указанных задач.

Работы по информационно-аналитическому сопровождению ФЦП ЯРБ включают также обеспечение публичности (открытости) информации о целевых индикаторах и показателях, о результатах мониторинга реализации мероприятий Программы. Для информирования заинтересованных лиц о ходе реализации ФЦП ЯРБ-1 в 2008 году специалистами ИБРАЭ РАН создан официальный сайт программы (<http://fcp-radbez.ru>), а в 2016 году после запуска ФЦП ЯРБ-2 разработан новый информационный интернет-портал (www.fcp-ярб2030.рф).



Главная страница официального сайта ФЦП ЯРБ-1



Главная страница информационного сайта ФЦП ЯРБ-2

Анализ долгосрочных рисков в сфере обеспечения ядерной и радиационной безопасности



Уткин Сергей Сергеевич

д.т.н., выпускник МФТИ, заведующий отделением анализа долгосрочных рисков в сфере обеспечения ядерной и радиационной безопасности, работает в ИБРАЭ РАН с 2000 г.

«Реализация мероприятий ФЦП ЯРБ-1 сопровождалась постановкой новых научно-технических вопросов с широким охватом критичных по уровню потенциальной опасности объектов.

В период 2008—2015 гг.

были решены такие задачи, как инвентаризация, ранжирование ядерно и радиационно опасных объектов, включая первичную регистрацию и отнесение отходов к особым. В итоге стал возможен системный анализ накопленных проблем, многие решения были апробированы на практике.

Все критичные объекты включены в федеральную целевую программу «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016—2020 годы и на период до 2030 года» (ФЦП ЯРБ-2), снята острота ситуации по десяткам объектов, в том числе выведены из эксплуатации и ликвидированы более 50 крупных объектов».

Задача современного этапа работы заключается в том, чтобы сделать следующие шаги, как минимум, в двух направлениях. Во-первых, требуется повысить качество прогнозирования рисков, от которого напрямую зависит успешность долгосрочного планирования работ в сфере завершающих стадий жизненного цикла. Это относится к обоснованию и выбору оптимальных стратегий захоронения РАО, сверхдлительному хранению ОЯТ и т. д. Важно учитывать, что прогноз по ряду процессов и явлений может быть выполнен только расчетными средствами. Вследствие фрагментарности или полного отсутствия опыта наблюдения этих явлений на характерных временных интервалах их описание возможно лишь с применением многомерных нестационарных мультимасштабных моделей, построенных на различных принципах (физических, физико-химических, квантово-химических). Возможности создания и применения таких моделей вплоть до недавнего времени были ограничены недостаточно высоким уровнем развития вычислительной техники.

Во-вторых, необходимо продолжить активную работу по проблемам, окончательные решения которых пока еще не достигнуты: переработки жидких отходов; закрытия пунктов глубинного захоронения жидких отходов; обращения с облученным графитом энергетических реакторов; обоснования и реализации программы исследований в подземной исследовательской лаборатории; вывода из эксплуатации АЭС.

В настоящее время Институт проводит масштабные и многоуровневые фундаментальные и прикладные исследования в сфере обращения с РАО в рамках государственного заказа, в интересах Госкорпорации «Росатом», ФГУП «НПО РАО», ФГУП «ПО «Маяк» и других предприятий ядерного топливного цикла. Рост компетенций по перечисленным направлениям, наличие высокого научно-технического потенциала и работы по постоянному развитию позволят в ближайшее время расширить перечень задач и услуг, которые могут быть решены нашими специалистами.

Разработка системы расчетно-прогностических комплексов для обоснования долговременной безопасности объектов ядерного наследия и пунктов захоронения РАО

Важное место в оценках потребностей интенсификации научно-технического прогресса в сфере обеспечения ядерной и радиационной безопасности занимают системы расчетных кодов. Основные направления развития программных средств и математических моделей связаны с:

- мультимасштабностью элементов в составе систем захоронения (от размеров порядка миллиметров для состава контейнера РАО до километров для описания вмещающей геологической среды);
- многообразием физических, химических и биологических процессов, влияющих на выход и распространение радионуклидов;
- необходимостью выполнения многовариантных расчетов при моделировании различных сценариев долговременной эволюции захоронения;

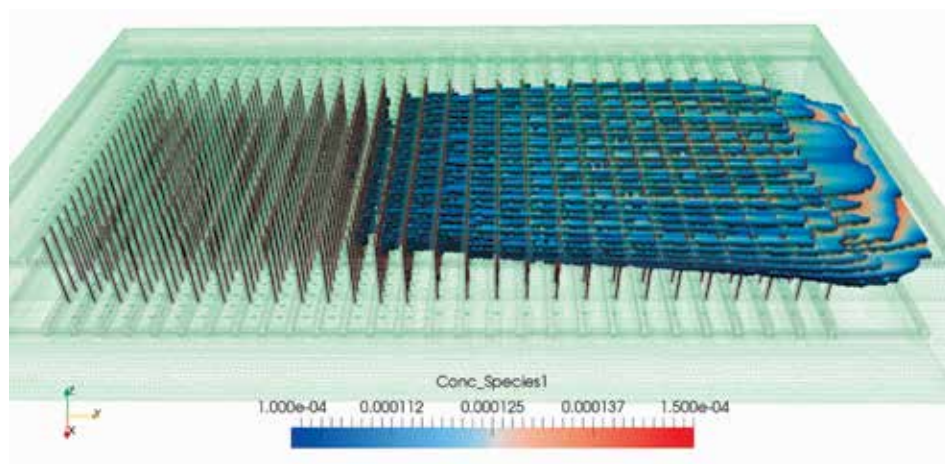
- необходимостью большого количества расчетов при анализе различных исходных значений параметров для получения оценок неопределенности и чувствительности.

В связи с этим к числу первоочередных задач разработки расчетных средств относятся:

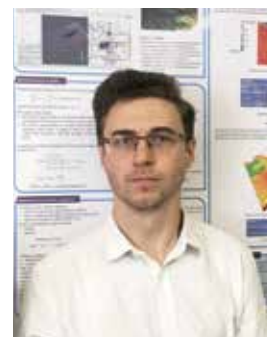
- переход от консервативного метода оценки безопасности к расчетам и моделированию на основе реальных и фактических исходных данных;
- переход от моделей отдельных процессов к моделированию объекта в целом;
- переход от упрощенных камерных, одномерных, двумерных и псевдотрехмерных моделей к детализированным трехмерным моделям;
- интегрирование крупномасштабных расчетных комплексов и моделей с САПР и локальными моделями систем и процессов;
- разработка новых расчетных методов для оптимизации вычислительного процесса (параллельные вычислительные алгоритмы, адаптивные неструктурированные сетки).

Трехмерное гидрогеологическое моделирование ЯРОО

В сотрудничестве с ИВМ РАН в лаборатории геомиграционного моделирования ИБРАЭ РАН разработан и аттестован расчетный код GeRa, предназначенный для трехмерного гидрогеологического моделирования, оценки безопасности пунктов захоронения РАО и других объектов, потенциально способных оказывать воздействие на грунтовые воды. Код GeRa ориентирован на использование современных вычислительных технологий: адаптивных неструктурированных сеток, высокопроизводительных вычислений с использованием суперЭВМ, методов конечных объемов для дискретизации задач. С его помощью выполняется оценка миграции радионуклидов (содержание которых на выходе из барьеров безопасности определяется на основе исследований деградации инженерных барьеров безопасности (ИББ) в лаборатории методологии обоснования безопасности) в геологической среде с учетом нестационарных граничных условий, влияния гидрологических объектов, геологических неоднородностей, техногенных объектов и пр.



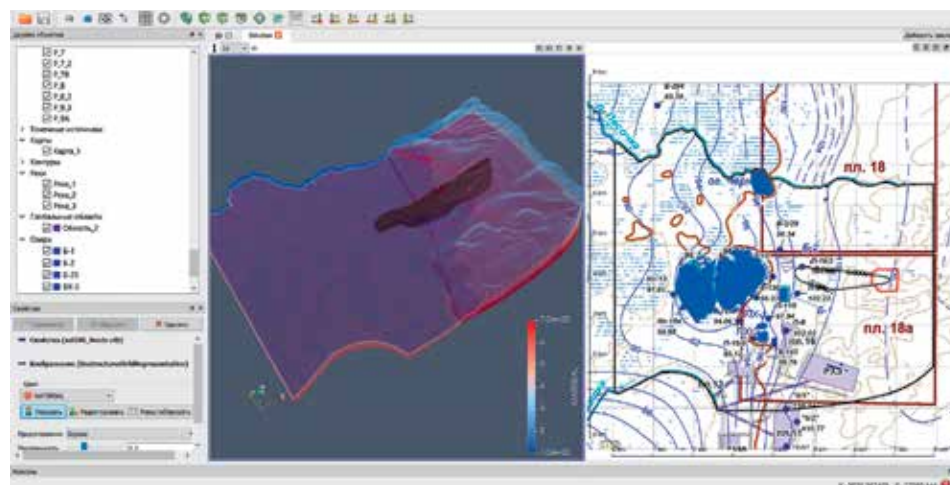
Моделирование распространения радионуклидов, выходящих через ИББ, в пределах пункта захоронения РАО



Капырин Иван Викторович

к.ф.-м.н., выпускник МГУ им. М. В. Ломоносова, зав. лабораторией геомиграционного моделирования, работает в ИБРАЭ РАН с 2011 г.

«Понимание обязательности применения выработанных на международном уровне требований и стандартов к обоснованию долговременной безопасности пунктов захоронения РАО и современная ситуация в части актуальности разработки и применения расчетных кодов для выбора оптимального варианта и критических сроков проведения работ, обоснования безопасности, эффективности проектных решений и отдельных операций по выводу из эксплуатации различных категорий объектов ядерного наследия и пунктов захоронения РАО, привело к необходимости разработки национальной системы импортонезависимых расчетных кодов».



Создание гидрогеологической модели пункта захоронения в расчетном коде GeRa



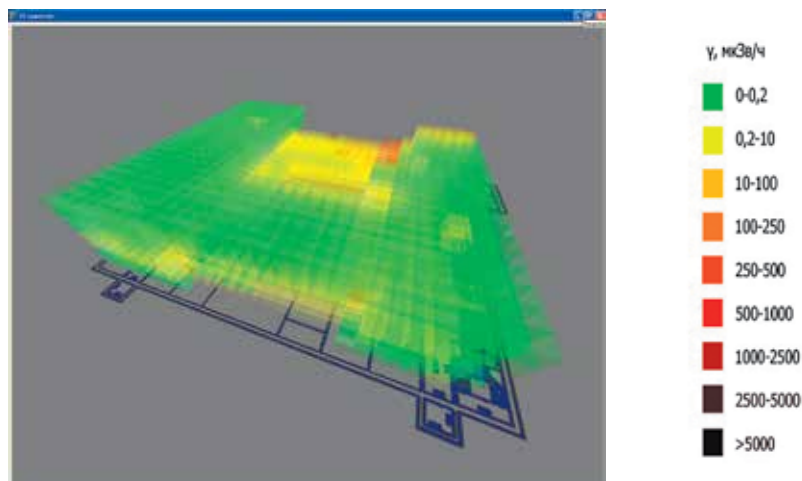
Крюков Дмитрий Вячеславович

к.т.н., выпускник Обнинского государственного технического университета атомной энергетики, зав. лабораторией методологии обоснования безопасности, работает в ИБРАЭ РАН с 2008 г.

«Институт уделяет особое внимание разработке методологии, методов, методик, моделей и расчетных алгоритмов анализа и обоснования безопасности объектов использования атомной энергии, а также применением их на практике при исследовании реальных объектов».

ПТК «ОБОЯН»

Разработан программно-технический комплекс обоснования безопасности объектов ядерного наследия (ОБОЯН), с применением которого выполнен комплексный анализ безопасности ряда объектов с применением современных приборов и расчетных средств, а также выбраны оптимальные стратегии по обращению с ними.

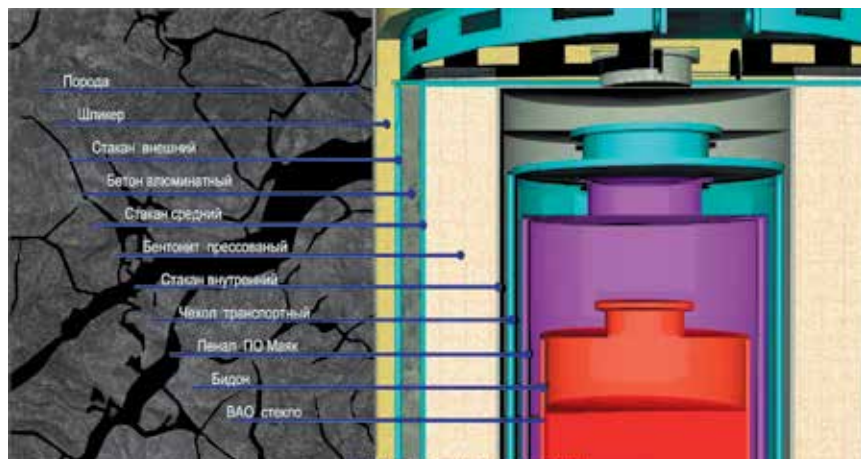


Определение радиационной обстановки в помещении объекта ядерного наследия

Анализ возможных сценариев эволюции объектов ядерного наследия осуществляется на основе результатов моделирования радиационных полей и миграции радионуклидов с учетом процессов деградации барьеров безопасности, а также оценки радиационных рисков для населения и персонала при различных условиях организации работ на этих объектах. Практическая отработка комплекса в полном объеме осуществлялась на площадке АО «ОДЦ УГР».

Программное средство DESTRUCT

Разработан инструмент DESTRUCT, предназначенный для анализа изменения свойств инженерных барьеров безопасности (ИББ) в результате долгосрочной эволюции материалов. Расчетное моделирование миграции радионуклидов через ИББ осуществляется с использованием мультифизических моделей, учитывающих физические, химические и тепловые процессы. Анализ этих процессов проводится на основе результатов исследований теплофизических свойств материалов, полученных в лаборатории прикладной механики сплошных сред ИБРАЭ РАН.



Структура инженерных барьеров безопасности, учитываемых при анализе эволюции материалов контейнеров, используемых для захоронения РАО

Программные инструменты оптимизации проектно-технологических решений

Совместно с АО «НЕОЛАНТ» разрабатывается программно-аппаратный комплекс проектирования, оптимизации и управления выводом из эксплуатации российских и зарубежных объектов использования атомной энергии (ПАК Digital Decommissioning), основанный на цифровых технологиях информационного и имитационного моделирования, виртуальной реальности, нацеленный на решение задач оптимизации разрабатываемых проектно-технологических решений.

Программные инструменты для расчета радиационных характеристик РАО и ОЯТ и функционалов полей ионизирующих излучений

К числу системных задач ЗСЖЦ ОИАЭ относится оценка характеристик полей ионизирующих излучений в элементах и конструкциях ОИАЭ и радиационных характери-



**Блохин
Павел Анатольевич**

выпускник НИЯУ МИФИ, м.н.с. лаборатории методологии обоснования безопасности, работает в ИБРАЭ РАН с 2010 г.

«При проработке вариантов реализации работ по заключительной стадии жизненного цикла (ЗСЖЦ) объектов использования атомной энергии (ОИАЭ) возникает потребность в оценке текущего состояния безопасности и её изменений при реализации технических решений, а также обоснования радиационной безопасности в ходе работ и в конечном состоянии по их итогам. Масштабно задачи ЗСЖЦ стали рассматриваться относительно недавно, поэтому их специализированное расчетное сопровождение и методическое обеспечение до последнего времени не разрабатывалось».



**Дробышевский
Николай Иванович**

с.н.с. лаборатории численного
моделирования
термомеханических процессов

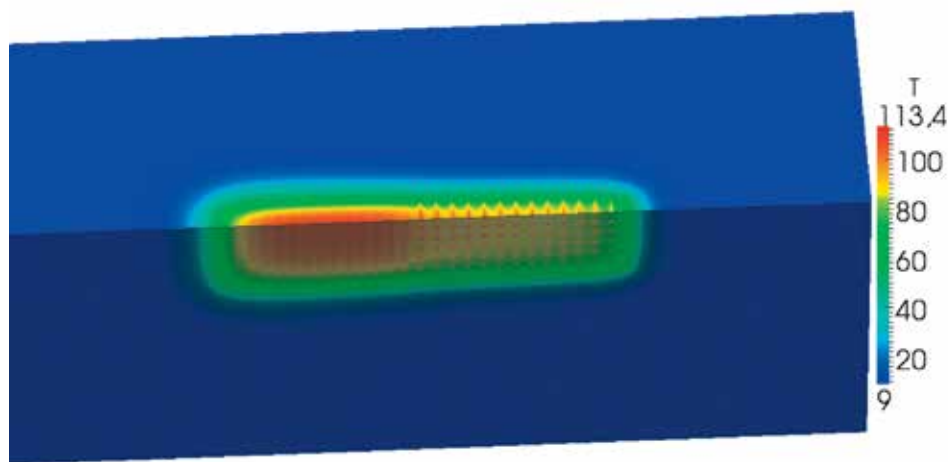
«Расчет изменений теплового режима, напряженно-деформированного состояния (НДС) и механической прочности элементов конструкции и вмещающей среды имеет важное значение при проектировании объектов захоронения РАО. Тепловые поля внутри и вокруг ПЗРО оказывают существенное влияние на протекание различных физических и химических процессов в ПЗРО».

стик РАО и ОЯТ. Здесь необходимо учитывать принципиальное отличие от задач обоснования радиационной безопасности при проектировании ОИАЭ, в которых заранее известны все ключевые параметры объектов (геометрия, характеристики источников ионизирующих излучений и т. д.), а неопределенности носят прогнозируемый характер. При обосновании безопасности ЗСЖЦ точная информация о характеристиках объекта отсутствует, а результаты проводимых практических измерений не всегда можно однозначно интерпретировать, что обуславливает необходимость разработки оригинальных подходов и оптимизации методологической базы.

В рамках решения этой сложной научно-технической задачи особо актуальны вопросы характеристики РАО и моделирования их поведения в условиях захоронения. Институт осуществляет тесную кооперацию с эксплуатирующими организациями, в частности с ФГУП «ПО «Маяк», где накоплено большое количество высокоактивных остеклованных РАО. Для моделирования поведения остеклованных РАО в условиях захоронения, в частности, прогнозирования изменения физико-химических свойств, растрескивания матрицы и т. д. разрабатывается специализированный расчетный код, базирующийся на опыте лаборатории разработки интегральных расчётных кодов ИБРАЭ РАН, полученный при создании расчетного кода нового поколения БЕРКУТ, с помощью которого моделируется поведение ядерного топлива в условиях облучения.

Программный инструмент FENIA для расчета тепловых полей

Специалистами лаборатории прикладной механики сплошных сред ИБРАЭ РАН разработан 3D-конечно-элементный код FENIA (*Finite Element Nonlinear Incremental Analysis*) для оценки процессов распределения тепловой нагрузки и механического разрушения вследствие термических, химических и биологических процессов внутри матрицы с РАО, а также в барьерах безопасности. Программный инструмент FENIA реализует совместное решение уравнений теплопередачи, расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) и движения воды в пористой среде.



Расчетное поле температур в ПЗРО через 55 лет с начала заполнения



Научный семинар в лаборатории геостатистического моделирования ИБРАЭ РАН, слева направо: к.ф.-м.н. Савельева-Трофимова Е. А., к.ф.-м.н. Свительман В. С., к.ф.-м.н. Нужный А. С. Горелов М. М., Ткачева А. А.,

В разработанной для ПЗРО в Нижнеканском массиве сеточной модели (сетка охватывает ПЗРО и 400 м горной породы вокруг него в каждом направлении) учитываются все скважины, заполняемые РАО, и растянутый по времени график их загрузки. В результате расчета получены данные об изменениях температурного поля внутри ПЗРО и в окружающей горной породе на период до 10000 лет.

Современные методики анализа данных и оценки достоверности результатов моделирования

Лаборатория геостатистического моделирования является ведущим подразделением Института в области разработки адаптивных методов анализа данных (аппроксимация, классификация, кластеризация данных, выявление признаков, учет неопределенностей) в применении к задачам геостатистики, создания искусственных нейронных сетей, текстмайнинга и методов калибровки параметров на основе использования эвристических оптимизационных алгоритмов.

Одним из значимых практических результатов этих исследований стала разработка специального программного продукта MOUSE, позволяющего выполнять оценку чувствительности расчетных моделей к их параметрам, а также проводить анализ неопределенности и оценивать достоверность результатов расчетно-прогностического моделирования по обоснованию безопасности объектов ядерного наследия и пунктов захоронения РАО. Программный продукт реализует механизмы, обеспечивающие взаимодействие со всеми расчетными комплексами, разрабатываемыми в Отделении анализа долгосрочных рисков в сфере обеспечения ядерной и радиационной безопасности.

Награждение к.ф.-м.н., и.о. зав. лабораторией геостатистического моделирования Савельевой-Трофимовой Е. А. за активную работу. Отчетное собрание в ИБРАЭ РАН





Линге Иннокентий Игоревич

выпускник МИИГАиК, гл. специалист,
специализация: информационные системы
и технологии, работает в ИБРАЭ РАН с 2014 г.



Самойлов Андрей Анатольевич

выпускник НИЯУ МИФИ, с.н.с. лаборатории
комплексной оценки состояния
радиационно опасных объектов,
работает в ИБРАЭ РАН с 2014 г.



Бирюков Дмитрий Викторович

выпускник Обнинского государственного
технического университета атомной энергетики,
м.н.с., специализация: оценка состояния
безопасности ЯРОО, многофакторный анализ
состояния ЯРБ, анализ инфраструктурного
обеспечения системы обращения с ОЯТ,
работает в ИБРАЭ РАН с 2008 г.

Системный анализ вопросов развития единой государственной системы обращения с РАО

ИБРАЭ РАН являлся ведущим исполнителем масштабного проекта «Первичная регистрация РАО». Результатом его реализации стала специальная методология отнесения накопленных РАО к удаляемым или особым и определение на ее основе конечных состояний всех пунктов хранения. В настоящее время продолжаются работы по подготовке изменений в Федеральный закон «Об обращении с РАО» и Постановление Правительства РФ от 19 октября 2012 г. № 1069 «О критериях отнесения твердых, жидких и газообразных отходов к радиоактивным отходам, критериях отнесения радиоактивных отходов к особым радиоактивным отходам и к удаляемым радиоактивным отходам и критериях классификации удаляемых радиоактивных отходов», а также работы по определению направлений оптимизации технологических процессов обращения с РАО и анализу радионуклидного состава РАО в контексте долгосрочной безопасности и разработки критериев приемлемости РАО.

Переход от стадии разработки концептуальных принципов обращения с РАО к их практической реализации требует регулярного системного анализа с целью своевременного разрешения возникающих проблем в нормативном и технологическом аспектах с целью повышения эффективности деятельности. В целом по каждому аспекту развития Единой государственной системы обращения с РАО (ЕГС РАО) можно выделить основные подходы, которые ИБРАЭ РАН предлагает использовать при определении долгосрочной стратегии, концепции или тактики на последующий период.

Очевидно, что развитие нормативно-правовой базы ЕГС РАО должно осуществляться на основе принципов радиационной защиты и в рамках долгосрочной стратегии, определенной положениями Объединенной конвенции о безопасности обращения с ОЯТ и РАО.

В отношении вопросов проведения первичной регистрации РАО и системы государственного учета и контроля следует осуществлять информационную реновацию, то есть вовлекать в анализ ориентированные на достижение конечного результата упорядоченные по времени и происхождению ряды данных, проводить глубокое структурирование учета.

Принципиальным в данном вопросе является обеспечение согласованности планов по развитию инфраструктуры по обращению с РАО, включая их захоронение, и актуальных потребностей производственной деятельности предприятий атомной отрасли и деятельности по ликвидации ядерного наследия. Эта согласованность должна быть достигнута путем гармоничного развития нормативно-правовой базы, углубления знаний в части характеристик РАО и процессов их переработки в контексте обеспечения долговременной безопасности РАО при их захоронении.

Анализ инфраструктурного обеспечения деятельности на завершающей стадии жизненного цикла объектов ядерного наследия

Широкий спектр проблем, связанных с ликвидацией объектов ядерного наследия, известен достаточно подробно. Очевидно, что их игнорирование или недостаточное внимание к многочисленным проблемным аспектам может повлечь за собой



Научный руководитель ИБРАЭ РАН академик Большов Л. А. открывает заседание секции «Экологическая и радиационная безопасность пунктов долговременного хранения, консервации и захоронения РАО» НТС №10 ГК «Росатом»

усугубление ситуации. Этим обусловлена важность и актуальность задач, решаемых ИБРАЭ РАН в контексте обеспечения ядерной и радиационной безопасности атомной отрасли.

Выработка научно обоснованных решений в сфере планирования работ по преодолению проблем ядерного наследия сопряжена с проведением многофакторного анализа состояния объектов, с оценкой потенциальных опасностей (рисков), а также с выполнением вариативных оценок развития необходимой объектовой инфраструктуры.

Сотрудники анализа долгосрочных рисков в сфере обеспечения ядерной и радиационной безопасности ИБРАЭ РАН осуществляют регулярный системный анализ выполненных и предстоящих работ в рамках ФЦП ЯРБ-2 с учетом опыта реализации программ прошлых лет. Цель такого анализа — мониторинг работ, оптимизация требований к инфраструктуре и снижение затрат на реализацию практических мероприятий по обращению с РАО, ОЯТ и выводу из эксплуатации объектов ядерного наследия.

Подготовка российских Национальных докладов в рамках Объединенной конвенции о безопасности обращения с РАО и ОЯТ

Одним из ключевых и масштабных международных форумов, посвященных безопасному использованию атомной энергии, в котором Российская Федерация принимает активное участие, является Совещание договаривающихся сторон по рассмотрению выполнения обязательств, вытекающих из Объединенной конвенции о безопасности обращения с отработавшим топливом и о безопасности обращения с радиоактивными отходами. Начиная с 2006 года и по настоящее время, ИБРАЭ РАН, во взаимодействии с Госкорпорацией «Росатом» и Ростехнадзором, осуществляет научное и аналитическое сопровождение всех стадий каждого из трехлетних циклов процесса, включая подготовку всех пяти национальных докладов Российской Федерации в рамках Объединенной



Дорогов Виктор Ильич

к.ф.-м.н., выпускник МИФИ, зав. отделом анализа рисков, работает в ИБРАЭ РАН с 2003 г.

«Актуальным направлением деятельности Института в сфере международного сотрудничества является участие в подготовке национальных докладов Российской Федерации в рамках Объединенной конвенции о безопасности обращения с отработавшим ядерным топливом и радиоактивными отходами. Конвенция, принятая в 1997 году и ратифицированная Российской Федерацией 19 апреля 2006 года, представляет собой основополагающий документ в области обеспечения безопасности использования атомной энергии».



**Богатов
Сергей Александрович**

к.ф.-м.н., выпускник НИЯУ МИФИ, с.н.с.,
специализация: экспериментальная ядерная
физика, работает в ИБРАЭ РАН с 1997 г.



**Ведерникова
Марина Владимировна**

к.т.н., выпускница НИЯУ МИФИ,
н.с., специализация: радиоэкология,
обращение с РАО,
работает в ИБРАЭ РАН с 2008 г.



**Александрова Татьяна
Александровна**

выпускница НИЯУ МИФИ, инженер,
специализация: проблемы обращения с РАО,
нормативные требования к обращению с РАО,
работает в ИБРАЭ РАН с 2017 г.

конвенции, ответов на вопросы Договаривающихся сторон к каждому национальному докладу и представления национальных докладов на всех пяти Совещаниях Договаривающихся сторон в МАГАТЭ.

В информационных, аналитических и научных работах по подготовке к Совещаниям в ИБРАЭ РАН принимает участие более 30 человек, в том числе 2 академика РАН, 6 докторов наук, 12 кандидатов наук, являющихся профильными специалистами в обеспечении безопасности в сферах, рассматриваемых Конвенцией. 21 мая – 1 июня 2018 года в Вене состоялось шестое Совещание Договаривающихся сторон по рассмотрению действия Объединенной конвенции, в котором приняло участие 69 стран.

Начиная с 2006 года и по настоящее время, ИБРАЭ РАН, во взаимодействии с Госкорпорацией «Росатом» и Ростехнадзором, осуществляет научное и аналитическое сопровождение всех стадий каждого из трехлетних циклов процесса, включая подготовку всех пяти национальных докладов по Объединенной Конвенции, ответов на вопросы Договаривающихся сторон к каждому национальному докладу и представления национальных докладов на всех пяти Совещаниях Договаривающихся сторон в МАГАТЭ. В информационных, аналитических и научных работах по подготовке к Совещаниям в ИБРАЭ РАН принимает участие более 30 человек, в том числе 2 академика РАН, 6 докторов наук, 12 кандидатов наук, являющихся профильными специалистами в обеспечении безопасности в сферах, рассматриваемых Конвенцией.

Нормативно-правовое обеспечение обращения с РАО

Начиная с 2007 года, участие в создании новой нормативно-правовой базы обращения с РАО, ориентированной на формирование Единой государственной системы обращения с отходами, является одним из приоритетных направлений деятельности ИБРАЭ РАН. В рамках этой деятельности Институт оказывал информационную, методическую и экспертную поддержку эксплуатирующим организациям и Госкорпорации «Росатом» при проведении первичной регистрации накопленных РАО (2013–2014 гг.), что в конечном итоге позволило разработать эффективные методики и критерии оценки доз, рисков, затрат и ущерба окружающей среде, необходимых для обоснования отнесения РАО к особым, и успешно применить эти методики при выработке взвешенных решений по более чем 70 объектам ядерного наследия.

Значимым событием для всей атомной отрасли России стало принятие в 2011 году федерального закона №190-ФЗ «Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации». В подготовке этого законопроекта важную роль сыграли специалисты ИБРАЭ РАН.

Проводимые в настоящее время ИБРАЭ РАН исследования в области обоснования безопасности пунктов захоронения РАО для населения и окружающей среды, основанные на международных рекомендациях и опыте, полученном в ходе реализации программ ФЦП ЯРБ, направлены на то, чтобы, подводя итог дискуссиям о гипотетическом долгосрочном влиянии этих объектов на биоту, разграничить вопросы радиоэкологии и проблемы обращения с РАО.

Анализ радионуклидного состава РАО в контексте оценки долгосрочной безопасности

Система измерений РАО изначально была ориентирована на обеспечение эксплуатационной безопасности. Вопросам же обеспечения долговременной безопасности уделялось меньше внимания. Это проявилось в недостаточной проработке проблем, связанных с характеристикой отходов, что может привести к негативным последствиям уже на этапах классификации удаляемых РАО и их переработки. В связи с этим, одной из перспективных задач, решаемых в настоящее время в рамках создания ЕГС РАО, является анализ радионуклидного состава РАО с целью выделения радиологически значимых радионуклидов в контексте оценки долгосрочной безопасности и создание методических подходов к определению их содержания. Эта информация вкупе с анализом технологий их переработки позволяет оптимизировать как требования к контролю радионуклидного состава, так и критерии приемлемости, которым должны соответствовать РАО при захоронении.



**Свительман
Валентина Семеновна**

к.ф.-м.н., выпускник МФТИ, н.с. лаборатории геостатистического моделирования, специализация: оптимизационные методы, анализ неопределенности и чувствительности в задачах обоснования безопасности, работает в ИБРАЭ РАН с 2014 г.

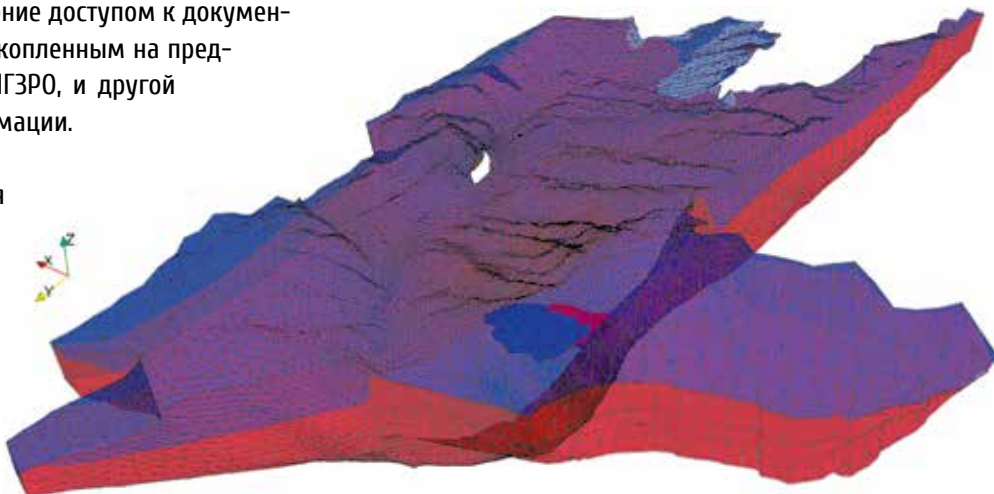
Практические работы по обоснованию долговременной безопасности пунктов глубинного захоронения РАО

Управление знаниями в Проекте создания ПГЗРО в Нижнеканском массиве

В международной практике обоснования безопасности ПГЗРО сохранность и доступность информации являются одним из приоритетов, поэтому вопросы управления данными и знаниями с использованием современных информационных технологий в этом контексте становятся все более и более актуальными.

В настоящее время в рамках работ по практической реализации программы исследований по обоснованию долговременной безопасности разрабатывается специальная система PULSE (Project of the Underground Laboratory Scientific Escort), которая представляет собой пилотную версию базы знаний по проекту ПГЗРО в Нижнеканском массиве горных пород. База данных PULSE, постоянно пополняясь, обеспечивает систематизацию и управление доступом к документам, отчетам, архивным материалам, накопленным на предшествующих этапах развития проекта ПГЗРО, и другой релевантной научно-технической информации.

На основе системы PULSE планируется создание виртуальной цифровой ПИЛ (подземной исследовательской лаборатории). Реализация этого проекта позволит повысить качество обоснования безопасности ПГЗРО, оптимизировать выработку экспертных оценок и рекомендаций, обеспечить эффективность и «прозрачность» принимаемых решений.



Трехмерная геомиграционная модель полигона «Северный»



Неуважаев Георгий Дмитриевич,

выпускник МГУ им. М. В. Ломоносова, м.н.с.
специализация: геология,
работает в ИБРАЭ РАН с 2015 г.



Сускин Виктор Викторович,

выпускник МГУ им. М. В. Ломоносова, м.н.с.
лаборатории геомиграционного моделирования,
работает в ИБРАЭ РАН с 2014 г.



Горелов Матвей Михайлович

выпускник МГУ им. М. В. Ломоносова,
м.н.с. лаборатории радиоэкологии,
работает в ИБРАЭ РАН с 2016 г.

Моделирование эволюции системы пункта глубинного захоронения ЖРО

Одним из важных достижений отделения стала разработка программного средства ГЕОПОЛИС, представляющего собой программную реализацию геофильтрационной-геомиграционной модели полигона «Северный»: трехмерная модель в совокупности с расчетным ядром (код GeRa) и базой данных полувекового мониторинга. Данное средство уникально по своей сложности, обширности моделируемых процессов, количеству собранных и использованных фактических данных.

ПС ГЕОПОЛИС представляет собой управляющую модель полигона «Северный» и используется для прогнозного моделирования распространения ореолов загрязнителей в геологической среде, моделирования последствий некоторых воздействий на ПГЗ ЖРО внешних событий и процессов в период эксплуатации полигона и после его закрытия, включая оценку долговременной безопасности.

**Стратегическое планирование комплексного решения проблем
Теченского каскада водоемов**

ИБРАЭ РАН на протяжении многих лет ведутся работы по обоснованию и выбору стратегии перевода в долговременное безопасное состояние крупнейшего в мире поверхностного хранилища жидких радиоактивных отходов — Теченского каскада водоемов (ТКВ). В рамках разработки Стратегического мастер-плана комплексного решения проблем ТКВ создан расчетный инструмент «ТКВ-Прогноз», который, в частности, обеспечивает оценку опасных последствий для различных сценариев управления гидротехническими сооружениями объекта в различных климатических условиях. Результаты выполненных расчетов позволили организовать комплексные мероприятия, направленные на самоочищение водоемов, а также сравнить различные стратегии управления сооружениями ТКВ и оценить их эффективность.



Моделирование состояния водного баланса ТКВ



Обсуждение вопросов радиоэкологии, слева направо: к.т.н Ведерникова М. В., к.ф.-м.н. Кондаков В. Г., Аракелян А. А., Гаврилина Е. А., Панченко С. В.

Прикладные исследования в области радиоэкологии

Институт придает большое значение научным исследованиям и прикладным работам в сфере радиоэкологии, направленным на оценку влияния объектов использования атомной энергии на окружающую среду и человека, разработку соответствующего инструментария для количественных расчетов рисков и возможного ущерба, рецензирование и подготовку рекомендаций и предложений по нормативной базе, включая такие аспекты, как обоснование критериев реабилитации территорий; корректировка системы ограничений воздействия предприятий атомной отрасли на биосферу; обеспечение экологической безопасности. Разработанные в ИБРАЭ РАН программные продукты позволяют решать сложные радиоэкологические задачи как на региональном уровне (пример — совместный проект с ДВФУ по оценке экологических рисков для населения Дальнего Востока России), так и на локальном уровне (пример — совместный проект ИБРАЭ РАН и правительства Челябинской области по оценке экологических рисков для населения, проживающего на берегу р. Теча).

Комплексная оценка техногенных рисков

В последние годы в лаборатории радиоэкологии ИБРАЭ РАН в сотрудничестве со специалистами Центра стратегического планирования и управления медико-биологическими рисками здоровью Минздрава России активно развиваются методы и расчетный инструментарий сравнительной оценки рисков от различных техногенных факторов, действующих на здоровье жителей крупных городских агломераций. Разработанные в Институте программы расчета рисков от химических и радиоактивных выбросов нашли широкое применение в различных экологических проектах. С 2016 г. в рамках совместной работы с ФГБУ «Гидроспецгеология» проводится цикл исследований по созданию информационных геоэкологических пакетов в районах расположения крупнейших предприятий атомной отрасли.



Аракелян Арам Айкович

выпускник МФТИ,
м.н.с. лаборатории радиоэкологии,
специализация: радиоэкология,
работает в ИБРАЭ РАН с 2008 г.



Панченко Сергей Владимирович

выпускник МИФИ,
зав. лабораторией радиоэкологии,
специализация: радиационная защита населения,
работает в ИБРАЭ РАН с 1993 г.



Саркисов Ашот Аракелович

академик РАН, вице-адмирал,
советник РАН

«Одной из актуальнейших проблем, связанных с решением задач комплексного социально-экономического развития и обеспечения экологической безопасности нашей страны, является радиоэкологическая реабилитация Арктической зоны Российской Федерации. Уникальная роль Арктики в формировании климатических и гидрологических процессов в мировом океане и высокая чувствительность арктической экосистемы к техногенным воздействиям требуют особого внимания к сохранению экологического равновесия в регионе. В последние годы Институт не только инициировал интерес в атомной отрасли к этому направлению, но и организовал собственные исследования по экологическим аспектам и технико-экономическому обоснованию применения в арктическом регионе атомных станций малой мощности, в том числе перспективных объектов малой энергетики — плавучих АЭС».

СТРАТЕГИЧЕСКОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ И ПРОЕКТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ В ОБЛАСТИ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Разработка и реализация крупномасштабных программ, направленных на решение сложных многопрофильных проблем, требует специального подхода к планированию и управлению. Такой подход называется стратегическим планированием. Он позволяет учитывать многочисленные факторы, влияющие на конечный результат работ, взаимозависимость отдельных элементов программы, синхронизировать усилия всех участников процесса, правильно определять приоритеты и оценивать риски. Методика стратегического планирования и информационно-аналитического обеспечения реализации разработанных планов освоена в ИБРАЭ РАН и успешно применяется для решения комплексных проблем ликвидации различных масштабных радиоэкологических угроз.

Участие ИБРАЭ РАН в решении проблем экологической реабилитации арктического региона

Несмотря на наличие в Арктике значительного количества ядерно и радиационно опасных объектов атомного наследия, использование атомной энергетики для покрытия возрастающих потребностей этого региона неизбежно. Это обусловлено исключительной экономической значимостью Арктики как кладези сырьевых ресурсов и перспективного узла мировых транспортных коммуникаций, а также важным оборонным значением арктического региона.

В 2002 году в ИБРАЭ РАН под научным руководством академика Саркисова А. А. был образован «Отдел прикладных проблем атомной энергетики», ориентированный на исследования проблем ликвидации масштабных радиоэкологических последствий «холодной» войны в арктическом регионе. Одним из значимых достижений Института в этой области стала разработка и научно-техническая поддержка программы (Стратегического мастер-плана) комплексной утилизации выведенных из состава ВМФ России атомных подводных лодок в Северо-Западном регионе РФ.

Со временем отдел претерпел ряд реорганизаций по статусу, названию, тематике и в 2013 году был преобразован в «Отдел системного анализа и стратегического планирования в области ядерной и радиационной безопасности». Соответственно этому изменялась и расширялась направленность его деятельности. В сферу научных интересов отдела, помимо традиционных для него проблем вывода из эксплуатации и комплексной утилизации АПЛ, вошли такие направления, как изучение проблемы



затопленных и затонувших радиационно опасных объектов в Арктической акватории, разработка сценариев гипотетических аварий на плавучих атомных объектах и изучение последствий их воздействия на окружающую среду, исследование возможности использования объектов малой атомной энергетики в удаленных (прежде всего — арктических) регионах, оценка их безопасности и конкурентоспособности, а также адаптация и применение методов стратегического планирования для управления сложными проектами, связанными с решением проблем ликвидации «ядерного наследия».

К числу таких проектов относятся:

- разработка программы утилизации и радиозэкологической реабилитации объектов атомного флота на Дальнем Востоке;
- стратегические мастер-планы решения проблем Теченского каскада водоемов ФГУП «ПО «Маяк» и исследований в обоснование безопасности пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов;
- обеспечение радиационной безопасности на объектах Российской академии наук.

Сегодня основными направлениями работ отдела являются:

- стратегическое планирование в области ЯРБ;
- информационно-аналитическое сопровождение реализации СМП утилизации и экологической реабилитации объектов атомного флота;

Академик РАН Саркисов А. А. и зам. директора ИБРАЭ РАН, д.т.н. Антипов С. В. (в центре) с сотрудниками отдела системного анализа и стратегического планирования в области ядерной и радиационной безопасности. Слева направо: д.т.н. Высоцкий В. Л., к.т.н. Билашенко В. П., к.ф.-м.н. Кобринский М. Н., Шведов П. А., к.т.н. Ильющенко Г. Э., к.т.н. Сотников В. А., Смоленцев Д. О., Хохлов И. Н., Ботян Л. В.

Отчетный семинар о деятельности отдела системного анализа и стратегического планирования в области ядерной и радиационной безопасности





Антипов Сергей Викторович

д.т.н., доцент, зам. директора ИБРАЭ РАН по вопросам стратегического планирования и проектного управления в области радиационной безопасности

«Поскольку даже из названия Института следует, что сфера его деятельности — проблемы безопасности атомной энергетики в широком смысле, одним из направлений нашей работы не могло не стать исследование вопросов обеспечения ядерной, радиационной и экологической безопасности объектов атомного флота и связанных с его функционированием морских акваторий и прибрежных территорий. Начатые уже в середине 1990-х гг. работы были ориентированы на проведение комплексных исследований, выработку рекомендаций по обеспечению безопасности выведенных из состава флота и подлежащих утилизации объектов (АПЛ, надводных кораблей с ядерными энергетическими установками, хранилищ отработавшего ядерного топлива и радиоактивных отходов, затопленных и затонувших объектов с ОЯТ и РАО) и участие в их реализации. В настоящее время исследования в данной сфере относятся к одному из приоритетных направлений деятельности ИБРАЭ РАН. Их результаты востребованы не только в России, но и за рубежом, поскольку эти исследования оказывают существенное влияние на повышение экологической безопасности всего северного полушария».

- адаптация ИСУП СМП для использования в управлении сложными проектами;
- исследование проблем, связанных с затопленными радиационно опасными объектами;
- компьютерное моделирование переноса радионуклидов в арктических морях;
- реконструкция и оценка последствий ядерной аварии в бухте Чажма;
- исследование возможности использования атомных станций малой мощности в удаленных регионах;
- организация и научное сопровождение работ по повышению радиационной безопасности объектов РАН.

Масштаб и разнородность задач, которые необходимо решить в ходе этой работы, их непосредственное влияние на практическую деятельность многих предприятий и организаций различной ведомственной подчиненности, в том числе зарубежных, потребовали применения современных методов организации работ, стратегического планирования и проектного управления. Эти методы были изучены, адаптированы к конкретным условиям и применены, в первую очередь, для решения проблемы безопасной комплексной утилизации выведенных из эксплуатации атомных подводных лодок.

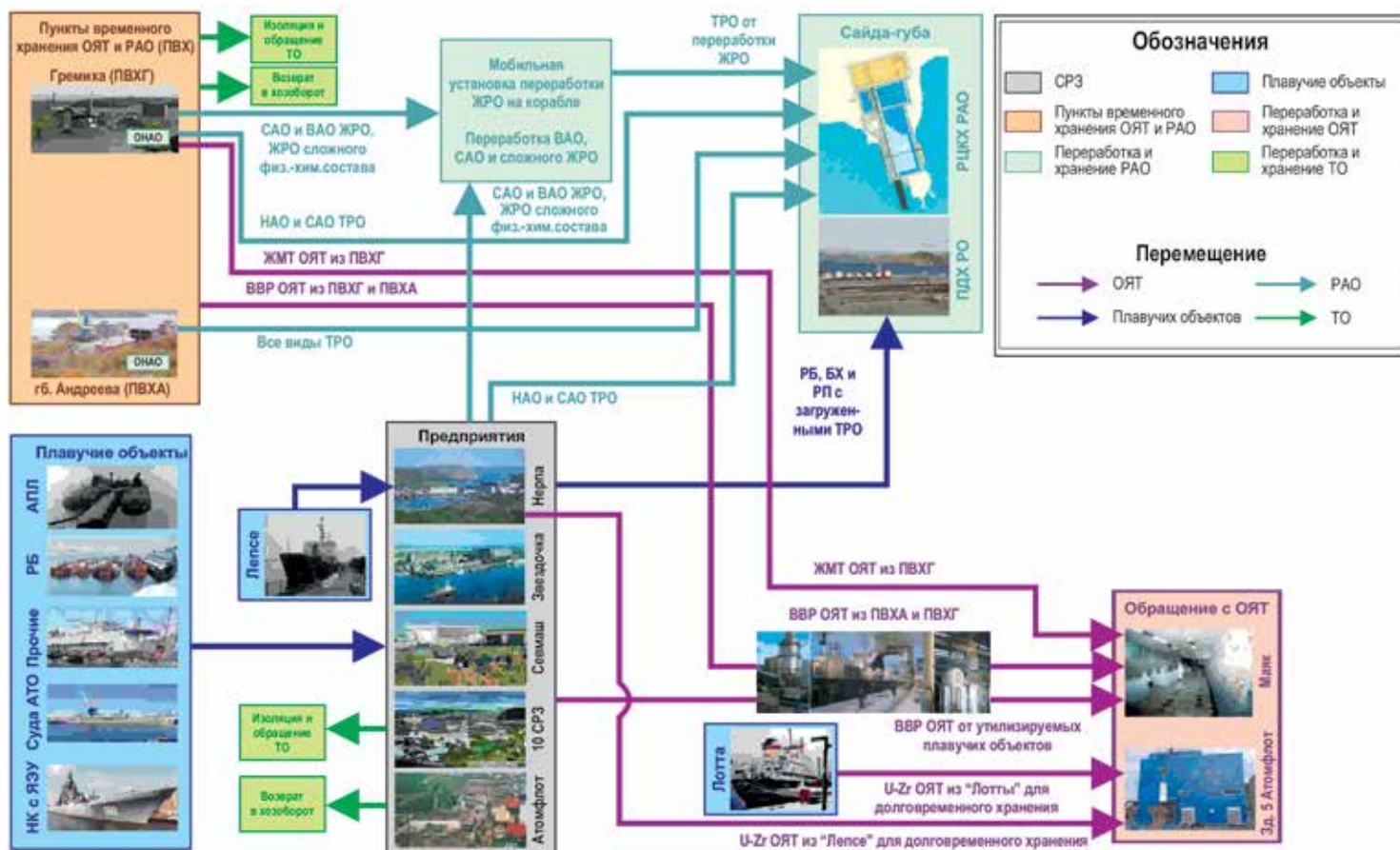
Стратегическое планирование безопасного вывода из эксплуатации объектов атомного флота

По поручению Минатома России (в настоящее время — Госкорпорация «Росатом») и при финансовой поддержке международного «Фонда экологического партнерства Северного измерения» (ЭПСИ) под научным руководством ИБРАЭ РАН был разработан «Стратегический Мастер-план утилизации и экологической реабилитации выведенных из эксплуатации объектов атомного флота и обеспечивающей инфраструктуры в Северо-Западном регионе России» (СМП), основу которого составила Программа комплексной утилизации АПЛ (ПКУ).

Этот сложный многоплановый и многоуровневый документ, в разработке которого принимали участие ведущие специалисты пятнадцати организаций России и двух организаций США и Великобритании, прошел международную экспертизу, организованную ЭПСИ, был официально утвержден и введен в действие руководством ГК «Росатом».

Применение стратегического подхода к планированию и реализации проектов в области комплексной утилизации АПЛ позволило сэкономить при реализации программы более 500 млн долларов США.

Цикл работ по ликвидации «ядерного наследия» на Северо-Западе России в 2013 году был удостоен Премии Правительства РФ в области науки и техники



Стратегия высшего уровня — «Дорожная карта» СМП



Институт проблем безопасного развития атомной энергетики (ИБРАЭ) Российской Академии Наук



Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники им. Н. А. Доллежалея



Российский научный центр «Курчатовский институт»



Российский Военно-морской флот



Федеральное государственное унитарное предприятие «Сев РАО»



Опытное конструкторское бюро машиностроения имени И.И. Африкантова



Научно-исследовательское проектно-техническое бюро «Онега»



Кольский научный центр Российской Академии Наук



СНПО «Элерон»



ФГУП Всероссийский научно-исследовательский и проектный институт энергетических технологий



ФГУП «Судоремонтный завод "Нерпа"»



ЦНИИ технологии судостроения



FLUOR

Основные участники разработки СМП



Лауреаты премии Правительства Российской Федерации 2013 года в области науки и техники на торжественной церемонии в Доме Правительства РФ

Некоторые результаты реализации СМП

Опыт, полученный при разработке СМП, был впоследствии применен для разработки Стратегического плана повышения радиационной безопасности объектов РАН и использован другими подразделениями института при разработке стратегических планов решения проблемы Теченского каскада водоемов и создания подземной исследовательской лаборатории в Нижнеканском массиве.



ПРАВИТЕЛЬСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

РАСПОРЯЖЕНИЕ

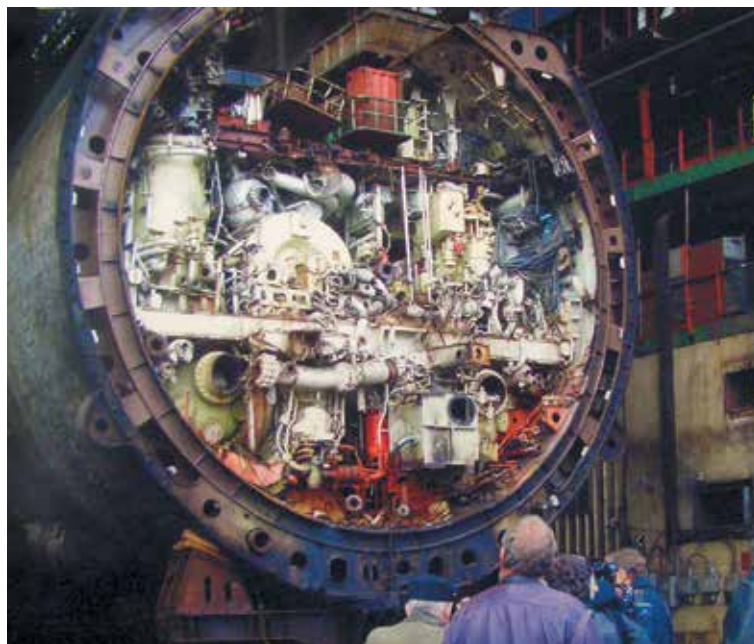
от 20 февраля 2014 г. № 230-р

МОСКВА

О присуждении премий Правительства Российской Федерации 2013 года в области науки и техники

Присудить премии Правительства Российской Федерации 2013 года в области науки и техники и присвоить звание "Лауреат премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники":

4. Саркисову Ашоту Аракеловичу, академику, профессору, советнику Российской академии наук, руководителю работы; Антипову Сергею Викторовичу, доктору технических наук, доценту, заместителю директора федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук, Большову Леониду Александровичу, члену-корреспонденту Российской академии наук, директору, Кобринскому Михаилу Натановичу, кандидату физико-математических наук, заведующему лабораторией, - работникам того же учреждения; Гончарюку Николаю Ивановичу, ведущему инженеру - конструктору открытого акционерного общества "Ордена Ленина Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники имени Н.А.Доллежалея", Мазокину Василию Александровичу, кандидату технических наук, заместителю начальника отдела - начальнику конструкторского бюро, Пименову Александру Олеговичу, кандидату технических наук, заместителю директора - генерального конструктора, - работникам того же акционерного общества; Захарчеву Анатолию Александровичу, руководителю проектного офиса Государственной корпорации по атомной энергии "Росатом"; Кухаркину Николаю Евгеньевичу, кандидату технических наук, доценту, советнику директора федерального государственного бюджетного учреждения "Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", Степенянову Борису Семеновичу, начальнику отдела того же учреждения, - за разработку научно-технических основ и информационно-аналитическое обеспечение ликвидации ядерного наследия на Северо-Западе России.



Утилизация АПЛ на заводе «Нерпа»

Информационно-аналитическое обеспечение реализации СМП

В процессе реализации сложной программы необходимо постоянно поддерживать актуальность информации о ходе выполнения работ и текущем состоянии всех проектов программы. Для этой цели в качестве составной части СМП была разработана информационная система управления программой (ИСУП). ИСУП была принята в промышленную эксплуатацию, поддержку которой совместно с СКЦ Росатома осуществляет созданная в ИБРАЭ группа информационного обеспечения ИСУП (ГИО ИСУП).

Описание ИСУП

ИСУП представляет собой программно-аппаратный комплекс, в основе которого лежат две связанные между собой реляционные базы данных (БД) в схеме, управляемой Microsoft SQL Server с трехзвенной архитектурой доступа.

Первая БД разработана специально с целью обеспечить отображение иерархической структуры ПКУ в виде системы таблиц. Главной таблицей, обеспечивающей интеграцию всей информации, важной для управления реализацией ПКУ, является таблица элементов структуры декомпозиции работ (СДР) ПКУ. К любой строке справочника СДР может быть «прикреплено» любое количество документов произвольного вида и формата. Таким образом, ИСУП может использоваться в качестве структурированного электронного архива СМП.

Вторая БД — стандартная схема Microsoft Project Server, содержащая всю информацию о календарных планах всех выполняемых и планируемых проектах ПКУ. Связь между двумя базами обеспечивает основную функциональность ИСУП: поддержку координации всех проводимых работ по проектам; предоставление руководителям проектов подробной и обобщенной информации о ходе их выполнения; помощь руководству ГК «Росатом» в разработке программы мероприятий на ближайшее будущее с учетом доступного финансирования. Клиентская часть ИСУП реализована в виде системы WEB-интерфейсов, обеспечивающих представление информации в удобной для пользователя визуальной, текстовой или числовой форме.

Широкое использование аппарата внешних межпроектных ссылок в календарных планах позволяет представлять в наглядной графической форме информацию о ходе работ по



На 1.04.2018 установлено 107 реакторных отсеков

Площадка долговременного хранения реакторных отсеков в Сайда-губе



**Существенно улучшена радиационная обстановка
Вывезено все ОЯТ из ВВЗР, включая дефектное (898 шт.)
Выгружены выемные части всех ЯР с ЖМТ
Разобраны 3 а.з. ЖМТ, топливо вывезено**

Пункт временного хранения в поселке Гремиха



**Существенно улучшена радиационная обстановка
Вывезен эшелон с ОЯТ из устаревших контейнеров тип 6
Построены укрытия над хранилищами ТРО
Создан комплекс по обращению с ОЯТ, вывезено
13 контейнеров ОЯТ, извлеченного из емкости 2А БСХ**

Пункт временного хранения в губе Андреева

Наименование задачи	%Вып.	Начало	Конец	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2
				1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1
Создание инфраструктуры для обращения с ОЯТ	99%	14.03.06	10.05.18													
Техническое задание (ТЗ) на обращение с ОЯТ	100%	14.03.06	05.07.07													
Предложение на проектирование комплекса обращения с ОЯТ	100%	14.03.06	17.10.07													
Легкое укрытие для хранения пустых контейнеров	100%	02.10.06	29.08.08													
Ремонт и перенос крана КПМ 40 с территории возле БСХ на причал ПМК-67	100%	01.06.07	12.10.07													
Ремонт крана КПМ 40	100%	18.12.07	09.09.08													
Изолирующее укрытие БСХ - предварительные/подготовительные работы	100%	04.12.06	20.03.08													
Изолирующее укрытие БСХ - проектирование и закупка	100%	20.12.06	31.03.10													
Нормализация радиационной обстановки на емкости БСХ 3А	100%	11.05.09	29.03.12													
Проектная документация по комплексу ОЯТ	100%	10.01.07	22.03.11													
Проектирование хранилища контейнеров - здание 151	100%	01.11.07	03.12.09													
Зд. 154 – Хранилище с механическим цехом	94%	18.09.06	09.05.18													
Демонтаж крана КПМ-40	100%	26.07.10	14.03.11													
Подготовка площадки для строительства укрытия емкостей БСХ	100%	24.05.10	09.05.11													
Разработка технического предложения на перегрузочное оборудование	100%	12.08.10	07.11.11													
Разработка и создание автоматизированной системы учета и контроля ядерных материалов (АСУиК)	100%	12.12.11	16.12.13													
Разработка и поставка установки гамма-сканирования	100%	13.03.12	18.02.14													
Строительство и ввод в эксплуатацию накопительной площадки	100%	07.07.11	31.05.16													
Проектирование и изготовление двух рельсовых тележек для транспортировки контейнеров	100%	24.10.13	29.12.16													
Проектирование, изготовление и поставка рельсового крана для перемещения контейнеров на причале	100%	02.08.12	24.08.15													
Проектирование, изготовление, установка 3 мостовых кранов в зд. 153 и 1 мостового крана в зд. 151	100%	13.11.12	23.12.16													
Поставка автотранспортного средства для перевозки контейнеров между накопительной площадкой и укрытием БСХ	100%	29.08.14	25.04.16													
Создание перегрузочного оборудования для выгрузки ОЯТ из ячеек БСХ	100%	14.05.13	15.02.17													
Разработка РКД и строительство укрытия БСХ (незавершенные работы)	100%	28.04.15	10.03.17													
Демонтаж отдельных систем и оборудования с комплекса БКВ на СРЗ «Звездочка» и доставка в гб. Андреева	100%	03.05.12	31.07.12													
Доставка имеющегося перегрузочного оборудования в ПВХА	100%	10.01.14	13.11.14													
Разработка, изготовление и доставка в ПВХА нестандартного оборудования	100%	10.01.14	23.07.15													
Ввод в эксплуатацию комплекса по обращению с ОЯТ	100%	02.01.17	16.05.17													
Разработка специального программного обеспечения (СПО) для обучения типовым работам в здании 153 и здании 151	100%	16.05.14	29.05.15													
Разработка транспортно-технологической схемы, регламента для извлечения и вывоза ОЯТ из ячеек БСХ	100%	10.01.14	11.12.14													
Разработка ОВОС для ПВХА	100%	16.05.14	21.05.15													

произвольно организованному набору проектов. Индивидуальные проекты с небольшим бюджетом и коротким сроком выполнения, необходимые для достижения какой-либо частной стратегической цели, порой «ускользают» от внимания руководителей при планировании бюджета на фоне долгосрочных и высокобюджетных проектов. ИСУП определяет для каждого не охваченного финансированием проекта предельную дату начала работ, которая не вызывает дополнительной задержки в достижении конечной цели и тем самым сводит к минимуму возможность такого нарушения координации.

Детальный учет связей «предшественник-последователь» позволяет также получать в ИСУП прогнозы сроков достижения частных стратегических целей со значительным упреждением. В качестве примера можно привести совокупность индивидуальных проектов, выполнение которых было необходимо

Сводный план создания комплекса по обращению с ОЯТ в губе Андреева по состоянию на 01.12.2017 г.

Главный экран ИСУП



для создания комплекса сооружений для извлечения и вывоза ОЯТ из блоков сухого хранения в губе Андреева. Сложность и объемность необходимых для этой цели работ иллюстрируется сводным календарным планом в ИСУП, в котором в скрытой форме детально учтены все связи, описывающие взаимозависимость проектов.

Примеры использования ИСУП в управлении реализацией СМП

В 2009 г. руководство ГК «Росатом» утвердило директивный план создания и ввода в эксплуатацию в феврале 2014 г. комплекса по обращению с ОЯТ в губе Андреева. Прогнозируемый ИСУП срок завершения всех работ приходился на 2015 г., однако, план был оставлен без изменений. В соответствии с ним, на 2014 и 2015 гг. в ФЦП «Утилизация вооружений и военной техники» были запланированы средства на осуществление вывоза ОЯТ из хранилищ ПВХА.

В ходе выполнения работ по созданию комплекса прогнозируемые ИСУП сроки его ввода в эксплуатацию постоянно «отставали» от первоначального плана, что отмечалось во всех аналитических отчетах, представляемых в ГК «Росатом». В конце 2015 г. прогноз ИСУП сместился на начало 2017 г., что полностью подтвердилось, реальные работы по извлечению ОЯТ из хранилища в ПВХА начались 16 мая 2017 г.

ИСУП оказывается полезной и для краткосрочного анализа хода работ. Внедренный в систему интерфейсный модуль «Управление по вехам» (см. изображение главного экрана ИСУП, «северный» лепесток) предоставляет пользователю простую визуальную индикацию прогнозируемых сроков наступления ключевых событий («вех») в текущих работах ПКУ. Цветовая индикация прогноза ИСУП для каждой вехи основана на сравнении двух интервалов времени: оставшегося до наступления планового срока вехи t_1 и накопленного к текущему моменту прогнозируемого ИСУП отставания от планового срока t_2 :

- если $t_2 < 0,15 t_1$;
- если $0,15 t_1 < t_2 < 0,3 t_1$;
- если $t_2 > 0,3 t_1$.

Такое представление, хотя оно и менее содержательно, чем детальный календарный план, позволяет сосредоточить внимание на «проблемных» этапах работ, не отвлекая пользователя на те работы, ход которых соответствует плану или незначительно отстает от него.

Наконец, ИСУП может использоваться и как инструмент имитационного моделирования для анализа возможных последствий принятия каких-то организационных или технических решений. Примером такого анализа был выбор варианта обращения с уран-бериллиевым ОЯТ реакторов с жидкометаллическим теплоносителем, установленных в АПЛ.

Было принято решение о том, что система обращения с U-Be ОЯТ будет развертываться на площадке НИИАР. В начале 2012 г., когда тендерная документация



Шведов Павел Алексеевич

зам. зав. отделом системного анализа и стратегического планирования в области ядерной и радиационной безопасности



Кобринский Михаил Натанович

к.ф.-м.н., зам. зав. отделом системного анализа и стратегического планирования в области ядерной и радиационной безопасности



Высоцкий Валентин Леонидович

д.т.н., зав. лаборатории системного и стратегического анализа ядерной и экологической безопасности



Изданные монографии, посвященные этой тематике

на строительство площадки в НИИАР была согласована, руководство проектного офиса утилизации АПЛ поручило ГИО ИСУП провести имитационное моделирование представленной НИИАР «дорожной карты» выполнения всего комплекса работ по обращению с U-Ве ОЯТ, включая разборку активной зоны на твэлы, переработку топлива и обращение с образовавшимися отходами. В результате этого анализа выяснилось, что помимо уже выделенного гранта необходимо затратить ~ 5,7 млрд руб. на создание инфраструктуры, технологий и оборудования, и дополнительно ~ 1,5 млрд руб. на переработку ОЯТ. При этом пуск системы обращения в эксплуатацию мог состояться не ранее 2023 г. при условии начала работ в 2013 г. Такие масштабы затрат средств и времени были неприемлемы. Было принято решение об изменении схемы обращения с U-Ве ОЯТ, в которой разборка активных зон для последующей транспортировки осуществлялась бы в пункте их текущего хранения в ПВХ пос. Гремиха, а переработка — на модернизированной инфраструктуре ФГУП ПО «Маяк». В результате уже в 2015 г. была разобрана первая активная зона и была завершена модернизация инфраструктуры ПО «Маяк», позволившая начать переработку этого топлива.

ИСУП — это инструмент информационно-аналитического обеспечения реализации сложных стратегических программ, который не ограничен предметной областью ПКУ СМП. Его применение к любой другой программе потребует лишь минимальную перенастройку интерфейсов для адаптации к другой предметной области. Но неременным требованием к подготовке исходных данных является создание такой структуры декомпозиции работ, которая позволит применять стандартные методы проектно-программного управления в ходе реализации программы.

Разработка подходов к решению проблемы реабилитации Арктических и Дальневосточных морей от радиационно опасных объектов атомного флота

В разработанный и успешно реализуемый «Стратегический Мастер-план утилизации и экологической реабилитации выведенных из эксплуатации объектов атомного флота и обеспечивающей инфраструктуры в Северо-Западном регионе России» в силу различных причин не были включены разделы, касающиеся решения аналогичных задач в Дальневосточном регионе, а также, проблем, связанных с многочисленными затопленными и затонувшими в арктических морях радиационно опасными объектами. Эти находящиеся на морском дне ЯРОО представляют собой определенную угрозу и требуют изучения.

Анализ радиоэкологических последствий гипотетических аварий на затонувших и затопленных ЯРОО

Резко возросший за последние годы интерес к освоению Арктики привлек внимание к проблеме затопленных в 1960—1993 гг. в ее акватории ядерно и радиационно опасных объектов атомного флота. Хотя общее число таких затопленных объектов составляет около 18000, большая длительность их пребывания на морском дне, обуславливающая процессы естественной дезактивации, позволяет утверждать, что



Районы затопления ЯРОО в Карском море

большинство из них перестало представлять какую-либо опасность. Поэтому реальный интерес для исследований и анализа представляют на сегодняшний день несколько десятков объектов, в основном содержащие ОЯТ:

- 3 атомные подводные лодки (АПЛ) с ОЯТ;
- 1 ядерный реактор с АПЛ заказ № 421 с ОЯТ;
- 1 контейнер с экранной сборкой ледокола с ОЯТ;
- 5 реакторных отсеков АПЛ (2 отсека с ОЯТ);
- 19 судов с твердыми радиоактивными отходами.

Дальнейшие возможные действия с этими объектами, направленные на снижение радиационной нагрузки на регион – консервация на морском дне (возведение дополнительных барьеров) или подъем, транспортировка и последующая утилизация на судоремонтных заводах – сопряжены с дополнительными рисками, в т. ч. с возможностью возникновения самопроизвольной цепной реакции.

Ввиду актуальности проблемы и ее соответствия тематике Института, в ИБРАЭ РАН проводятся исследования, целью которых является прогнозирование и получение взвешенных оценок радиационных и радиэкологических последствий гипотетических аварий. В рамках исследований проводятся уточнение информации об объектах, моделирование физических процессов и ситуационный анализ, ранжирование объектов по степени опасности, определение очередности проведения реабилитационных работ, разрабатываются сценарии гипотетических аварий, оценивается выход радиоактивности в окружающую среду, проводится компьютерное моделирование распространения радионуклидов в акватории Арктики и т. д.



Билашенко Вячеслав Петрович

к.т.н., с.н.с. лаборатории системного и стратегического анализа ядерной и экологической безопасности



Хохлов Игорь Николаевич

ведущий инженер лаборатории системного и стратегического анализа ядерной и экологической безопасности



Сотников Владимир Андреевич

к.т.н.; инженер лаборатории системного и стратегического анализа ядерной и экологической безопасности

Для построения прогнозов, отвечающих мировому уровню, необходимы специализированные базы данных, а также программные комплексы, требующие значительных вычислительных ресурсов. Поэтому ИБРАЭ РАН широко взаимодействует с профильными организациями Академии наук, такими как Институт вычислительной математики им. Г. И. Марчука и Институт океанологии им. П. П. Ширшова.

В результате работы:

- собраны уточненные данные о местоположении объектов, об их активностях на момент затопления, а также выявлены причины расхождения данных в литературных источниках;
- обобщена и структурирована информация по проведенным консервационным работам;
- предложен метод оценки коррозионного разрушения объекта, учитывающий различные скорости коррозий для различных металлов и свойства морской воды. Предложена модель, позволяющая определить наиболее вероятные пути и оценить сроки разрушения защитных барьеров;
- разработана методика оценки скорости выхода радионуклидов с активированных поверхностей составных частей объекта;
- проведены расчеты скорости выхода радионуклидов в морскую среду для каждого затопленного объекта или типовой группы таких объектов;
- оценена область загрязнения морской воды в результате постепенного поступления в нее техногенных радионуклидов из разрушающихся объектов;
- рассчитаны уровни радиоактивного загрязнения Арктической акватории в результате переноса радиации морскими течениями в случае возникновения аварий на затопленных объектах;
- определены уровни радиационного воздействия на морскую биоту в различных районах Арктической акватории в случае аварий на затопленных объектах и предложены меры по минимизации последствий таких событий и обеспечению защиты населения;
- разработаны, зарегистрированы в Роспатенте программы для ЭВМ и получены соответствующие свидетельства «Программа для прогноза состояния затопленных и затонувших ядерных и радиационно опасных объектов с учетом их конструктивных особенностей» и «Программа для прогноза скорости поступления техногенных радионуклидов в результате коррозионных процессов на активированных поверхностях ЗЯРОО».

Полученные результаты регулярно публикуются в профильных российских и зарубежных научных изданиях, были пред-

ставлены на международных конференциях и совещаниях в Москве, Мурманске, Новосибирске, Осло, Бергене, Париже. Наиболее полные результаты изданы в виде монографий.

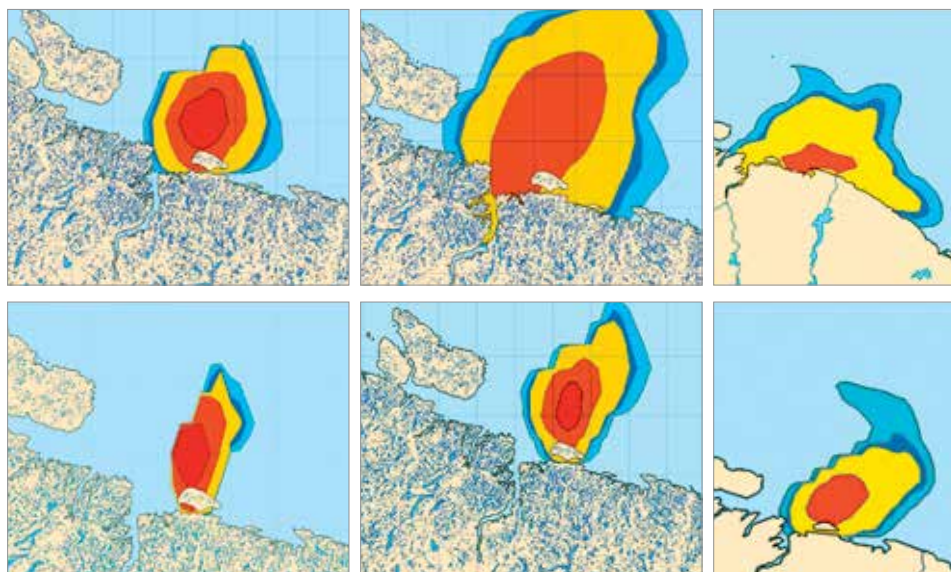
Некоторые результаты моделирования переноса радиоактивности в морской среде

Актуальной задачей является изучение последствий возможных аварий на морских радиационно опасных объектах с выходом радиоактивности в окружающую среду. С этой целью проводится математическое моделирование распространения радионуклидов в акватории Арктики при различных сценариях аварий для различных объектов и различных мест их нахождения (на дне, при транспортировке после подъема, на предприятии по утилизации), оценивается степень влияния переносимых радионуклидов на окружающую среду. По результатам моделирования вырабатываются рекомендации для принятия мер по минимизации возможных отрицательных последствий радиоактивного загрязнения. Ниже приведены некоторые иллюстрации полученных результатов моделирования.

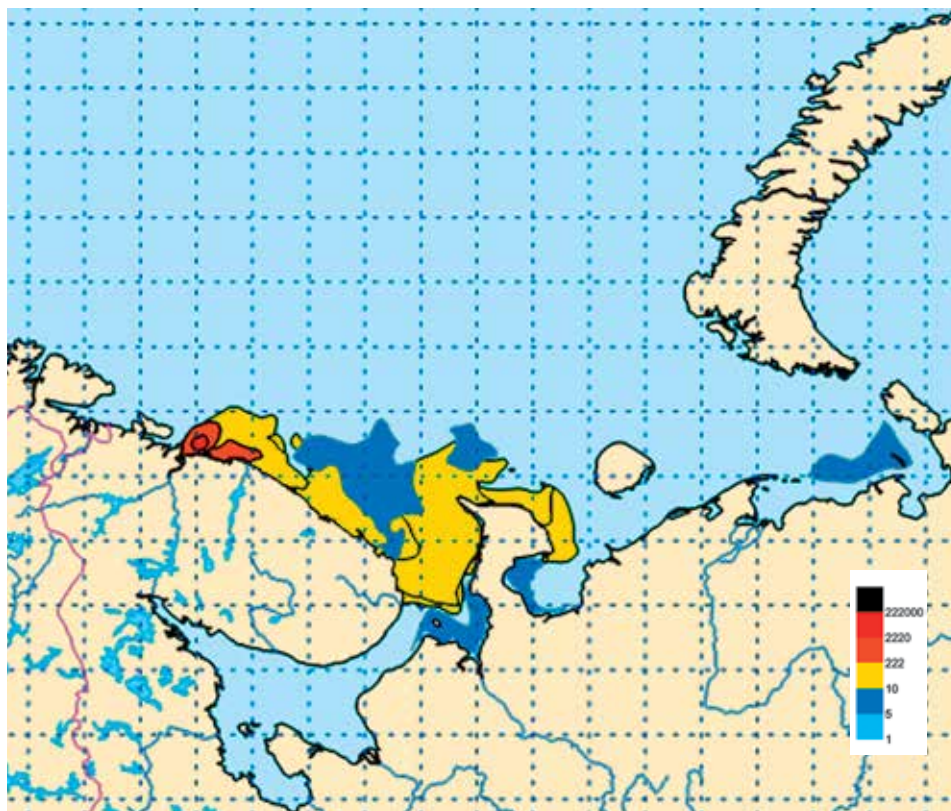
Работы по данному направлению также выполняются по заказу Еврокомиссии международным консорциумом, образованным итальянской компанией SOGIN, норвежской NRPА, германской EWN и британской NUVIA. С российской стороны в работе принимает участие ИБРАЭ РАН. Бенефициаром результатов работы является ГК «Росатом».

Моделирование процессов коррозионного разрушения защитных барьеров РАО в морской среде

Математическое моделирование физических процессов, которые могут привести к выходу активности за пределы защитных барьеров затопленных ядерных и радиационно опасных объектов в окружающую среду, рассматривается как один из способов оценки экологической нагрузки на морские экосистемы в результате возможных аварийных ситуаций. Была предложена модель и разработаны программные решения, которые вносят существенный вклад в развитие представлений о механизмах деградации барьеров безопасности затопленных ЯРОО. На разработанные компьютерные программы получены Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.



Изменение пространственно-временных характеристик зон радиоактивного загрязнения морской воды при возникновении гипотетической аварии на АПЛ К-159 на поверхности (верхний ряд) и на дне (нижний ряд) за время 3, 13, 28 суток.



Схематическое представление генерального направления перемещения областей с наибольшими значениями радиоактивного загрязнения морской воды в период до 1,5 лет после гипотетической ядерной аварии на АПЛ К-159. Четко просматривается тенденция перемещения загрязнения на восток, в отличие от результатов моделирования, проведенного западными партнерами



Свидетельства о государственной регистрации разработанных в ИБРАЭ РАН ПС «Распространение техногенных радионуклидов при коррозионном разрушении морских объектов»

Основу модели составляет представление радиационно опасного объекта в виде направленного взвешенного графа, в котором вершинами являются защитные барьеры, изолирующие опасные материалы от окружающей среды, а ребрами — пути последовательного разрушения защитных барьеров. Вес каждого ребра отражает время, необходимое для разрушения соответствующего защитного барьера.

Минимальное остовное дерево (МОД) такого графа отражает наиболее вероятную последовательность разрушения и позволяет предсказать потребное для этого время. Известны различные алгоритмы нахождения МОД; один из них — алгоритм Дейкстры-Прима — использован в настоящей модели для разработки программного кода. Модель позволяет учесть стохастический характер наиболее опасного коррозионного процесса — питтинговой коррозии, скорость которой может значительно превышать скорость общей коррозии. Учёт питтинговой коррозии наиболее важен при проведении ситуационного анализа.

Учитывая стохастический характер питтинговой коррозии, мы предположили, что ее скорость является случайной нормально распределенной величиной. В этом случае зависимость глубины питтинга от времени описывается стохастическим процессом случайного блуждания с непрерывным временем. В качестве примера по разработанной модели были вычислены средние значения и среднеквадратичные отклонения скоростей питтинговой коррозии для наиболее типичных затопленных объектов — контейнеров с твердыми радиоактив-

ными отходами, изготовленных из углеродистой стали Ст.3 с толщинами стенок $d = 3$ мм и $d = 5$ мм. Исходя из положенных в основу моделирования оценок, времена нарушения герметичности контейнеров с ТРО составят (15 ± 3) лет для $d = 3$ мм и (25 ± 3) лет для $d = 5$ мм.

Результаты экспедиций к местам затопления контейнеров с твердыми радиоактивными отходами позволяют говорить о согласованности наших расчетных оценок с данными, полученными в ходе натурных исследований. В СССР и России сбросы твердых радиоактивных отходов продолжались до 1992 г. С тех пор стенки контейнеров в результате язвенной и общей коррозии утратили свои защитные свойства. По результатам всех вышеперечисленных исследований можно сделать вывод: сегодня поступающие из них в морскую воду радионуклиды уже не представляют сколь-нибудь заметной опасности для окружающей среды в связи с тем, что основная масса радиоактивных веществ поступила в морскую воду в период 1980–2005 гг.

Разработка методологии реконструкции и оценка радиационных последствий ядерной аварии 1985 г. на АПЛ в бухте Чажма

Учитывая, что современные ядерные энергетические корабельные установки в основном аналогичны реакторной установке аварийной АПЛ К-431, при перегрузке ядерного топлива которой в 1985 г. произошла ядерная авария в бухте Чажма,

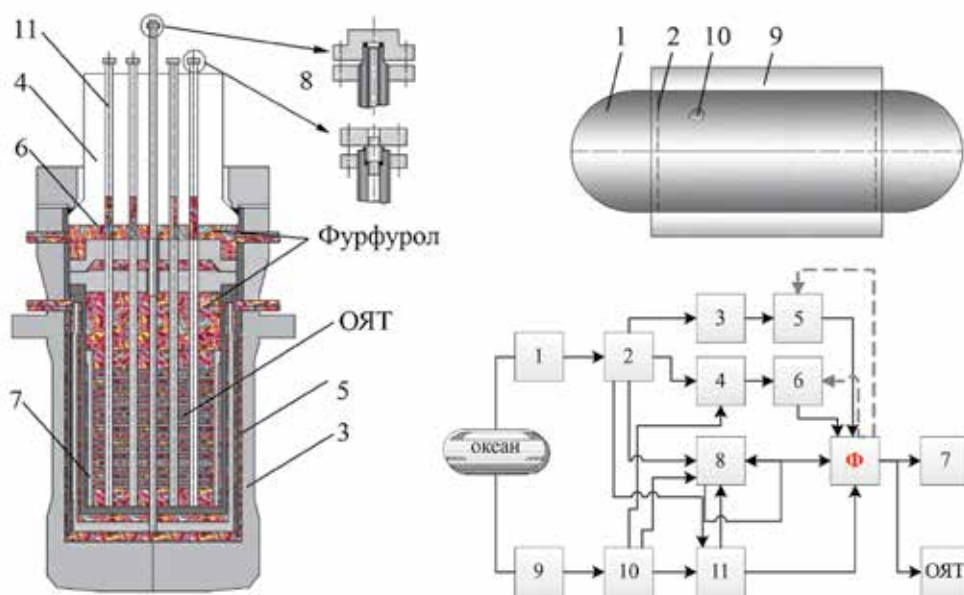
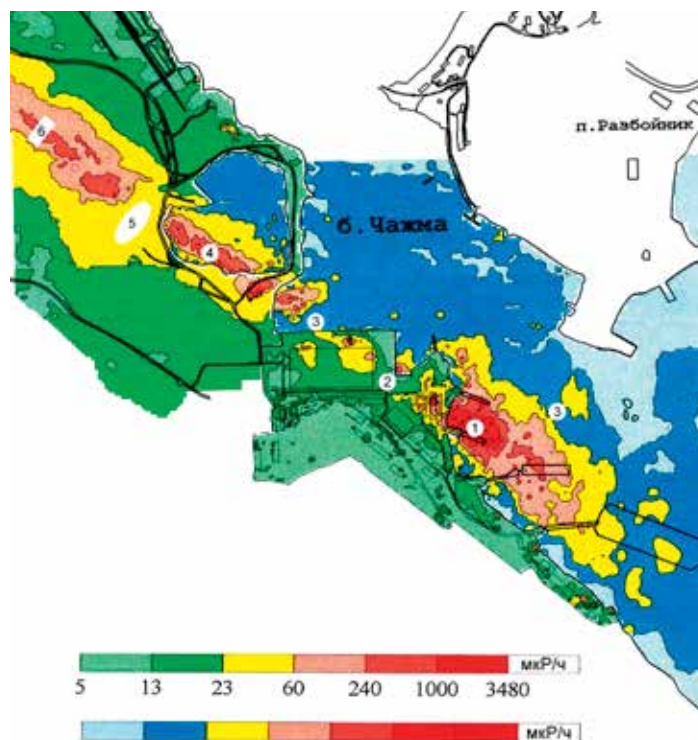


Схема консервации реакторного отсека атомной подводной лодки заказа 901 с отработавшим ядерным топливом и ее представление в виде направленного графа коррозионного разрушения защитных барьеров. Барьеры из углеродистой стали со скоростью коррозии $\sim 65 \pm 15$ мкм/год — 1, 2, 3, 4, 8, 9, 10 — буль, внутренняя переборка РО АПЛ, крышка реактора, корпус реактора, легкий корпус, прочный корпус АПЛ, фланцы толщиной 5, 10, 400, 100, 5, 27, 20 мм соответственно, из коррозионно-стойкой стали со скоростью коррозии $\sim 2 \pm 0,5$ мкм/год — 5, 6, 7, 11 — плакировка корпуса, крышки реактора, внутриреакторные конструкции: патрубки органов управления и защиты реактора толщиной 5, 5, 5, 2 мм соответственно; Ф — твердеющий радиационно-стойкий консервант на основе фурфурола

реконструкция (восстановление) причин, хода и последствий аварии является актуальным и своевременным для обеспечения безопасности современных ЯЭУ, населения и окружающей среды. Это еще одна из научных задач отдела. Ввиду закрытости сведений по многим направлениям аварии до настоящего времени нет объективных данных о ее последствиях. Это потребовало скрупулезного подбора, внимательно-го изучения, анализа и правильной интерпретации имеющейся информации. Исследования проводились по следующим направлениям:

- сбор, анализ и обобщение данных, характеризующих ядерный и радиационный потенциал АПЛ перед аварией, прилегающую инфраструктуру, экологическую обстановку;
- систематизация и оценка степени достоверности информации, связанной с радиационным и дозиметрическим контролем на всех этапах аварии;
- анализ ядерных аварий с ЦР в СССР / России и зарубежных странах, их радиационных, радиозологических последствий.
- восстановление и дополнение гидрометеорологических данных для прогнозирования распространения техногенных радионуклидов после аварии в воздушной и морской среде;
- разработка методологии реконструкции ядерной аварии ЯЭУ на АПЛ К-431, сценариев ее развития, оценки факторов воздействия на человека и окружающую среду;
- реконструкция радиационной обстановки на момент аварии в эпицентре и зоне строгого режима, на судах, находившихся в акватории бухты Чажма;
- оценка мощности взрыва в тротиловом эквиваленте;
- анализ ядерно-физических процессов, протекавших при ЦР в корабельном реакторе;
- ретроспективное восстановление по данным радиационной разведки и последующих исследований обстановки на всех этапах формирования радиоактивного следа и переноса радиоактивных веществ воздушным и морским путями с использованием пакетов «TRACE», «Нострадамус», «ПРОЛОГ» и др.;
- оценка воздействия на персонал факторов аварии в момент взрыва, первые минуты, часы, когда невозможно было проводить систематический дозиметрический и радиационный контроль;
- восстановление пространственного расположения радиоактивных отходов, относящихся к аварии, их радионуклидного состава и активности;
- оценка по состоянию на текущее время и прогноз изменения радиозологической обстановки на судоремонтном заводе, в радиоактивном следе, акватории бухты Чажма и прилегающей части Японского моря;
- рассмотрение вопросов и проблем, связанных с окончательной ликвидацией последствий ядерной аварии (завершение реабилитации);
- выполнение сценарного анализа возможного развития подобных событий на морских акваториях в Дальневосточном регионе, оценка последствий гипотетических радиационных аварий в Японском море, проливных зонах и на Камчатке.

В результате проведенных исследований собран и проанализирован фактический материал об аварии. Приведена обоснованная оценка данных, полученных по результатам непосредственных измерений в период аварии и на различных этапах контроля состояния актуальных зон загрязнения и облучения персонала и населения вплоть до современного уровня. Значимые данные подтверждены дополнительными расчетами. Сформулирован и подтвержден важный вывод о недопустимости отступления от требований нормативной и эксплуатационной документации на всех этапах эксплуатации ядерных объектов. Проведено моделирование переноса активности в морской и воздушной средах.



Участки реабилитации сооружений, территорий и акватории на радиоактивном следе, образовавшемся в результате аварии ЯЭУ на АПЛ «К-431» в бухте Чажма в 1985 г.

(1 — место аварии; 2 — судоремонтный завод; 3 — бухта Чажма, причальная стенка, фарватер; 4 — озеро-котлован; 5 — гравийный карьер; 6 — траншейное хранилище)

*Эксперты ИБРАЭ РАН обследуют
радиационно опасные объекты РАН*



Ильющенко Георгий Эдуардович

к.т.н, доцент, с.н.с. лаборатории проектного управления в области ядерной и радиационной безопасности



Евсеев Владимир Федорович

заведующий Ведомственным информационно-аналитическим центром учета и контроля радиоактивных веществ и радиоактивных отходов в Российской академии наук



*Стратегический план повышения
радиационной безопасности объектов РАН*



Разработка стратегического плана и организация реализации работ по повышению радиационной безопасности объектов РАН

Проблемы в области радиационной безопасности (РБ) объектов РАН носят во многом исторический характер и связаны с периодом времени, когда более 150 институтов АН СССР принимали активное участие в исследованиях, связанных с изучением свойств ядерных, радиоактивных материалов и явлений в интересах реализации в стране атомного проекта, т.е. носят характер «ядерного наследия».

Учитывая то, что многие из радиационно опасных объектов РАН расположены в крупных городах и находятся не в лучшем состоянии, работы по ликвидации накопленных проблем в области радиационной безопасности этих объектов были предусмотрены завершённой и ныне действующей Федеральными целевыми программами «Ядерная и радиационная безопасность РФ». ИБРАЭ РАН участвует в этих работах с 2009 года на основании Распоряжения Президиума РАН и Государственных контрактов, заключённых с ГК «Росатом».

Для эффективного решения задач обеспечения радиационной безопасности объектов РАН ИБРАЭ РАН в 2011 году, используя ранее полученный опыт стратегического планирования и применения его для задач вывода из эксплуатации и реабилитации радиационно опасных объектов атомного флота, разработал Стратегический план повышения радиационной безопасности объектов РАН.

В нем выполнен анализ состояния РБ в организациях РАН, составлен перечень объектов РАН, на которых имеются ИИИ и проблемы в области радиационной безопасности, определены конечные стратегические цели этой деятельности и возможные пути их достижения, разработана структура декомпозиции работ, позволяющая системно отразить выявленные проблемы и оптимизировать последовательность необходимых действий. В документе представлен перечень первоочередных работ на

168 объектах в 43 организациях РАН, сформированный в соответствии со специально проведенной процедурой приоритизации первоочередных работ, а также выполнено календарное планирование и планирование финансового обеспечения процесса. Это позволило приступить к проведению практических работ и получить реальные результаты.

Но, несмотря на это, оставшийся объем нерешенных проблем все еще значителен. При этом надо учитывать ряд факторов, осложняющих работу: большое количество организаций РАН, имеющих ИИИ, РАО, рассредоточены по всей стране; их инженерные системы, обеспечивающие радиационную безопасность, крайне изношены и продолжают устаревать; полная и достоверная информация о реальном состоянии объектов часто отсутствует; количество объектов РАН с проблемами РБ после слияния с ней РАМН и РАСХН значительно возросло.

В соответствии со Стратегическим планом работы по обеспечению РБ РАН выполняются по 6 направлениям:

- Обследование и дезактивация помещений для работы и хранения ИИИ, РВ и РАО, обследование и реабилитация радиационно загрязненных территорий.
- Вывод из эксплуатации радиационных установок, подготовка к вывозу на захоронение отслуживших ИИИ и РАО.
- Приведение помещений для работы с ИИИ, РВ, РАО в соответствие с требованиями Федеральных норм и правил по РБ (ФНП).
- Модернизация спецсистем (спецвентиляции, спецканализации, биологической защиты и т. д.).
- Модернизация систем радиационного и дозиметрического контроля.
- Модернизация систем физической и противопожарной защиты хранилищ и помещений для работы с ИИИ.

Основные результаты

За 10 лет проведения работ по повышению РБ в рамках финансирования из ФЦП ЯРБ в 45 организациях РАН выполнено 515 проектов. Это позволило снять наиболее острые проблемы «ядерного наследия» в области радиационной безопасности на объектах РАН и позволяет надеяться на успешное завершение этих работ до окончания ФЦП ЯРБ.

Ход и результаты выполнения работ по повышению радиационной безопасности неоднократно докладывались и обсуждались на научных конференциях, международных форумах и выставках.

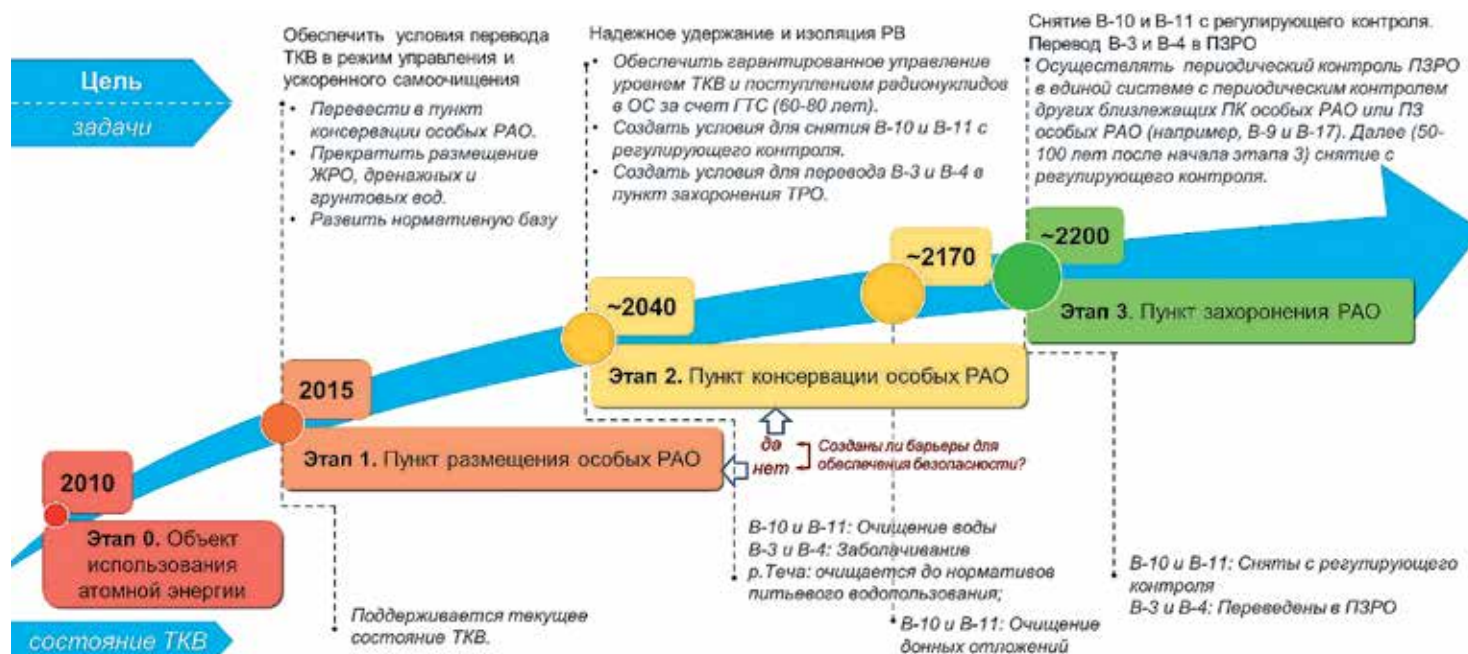
Конечной целью выполнения работ является ликвидация проблем ядерного наследия в организациях РАН путем приведения состояния радиационно опасных объектов РАН в соответствие с требованиями Федеральных норм и правил по РБ, что, в свою очередь, позволит решать научные задачи на более высоком качественном уровне.

Стратегическое планирование комплексного решения проблем Теченского каскада водоемов

Впервые к углубленному анализу вопросов безопасности отдельных объектов обращения с РАО специалисты Института обратились в конце 1990-х годов, когда совместно со специалистами Международного института прикладного системного анализа (IIASA) был реализован проект «Реабилитационные и защитные мероприятия, связанные с загрязнением реки Течи вследствие сбросов радиоактивных веществ ПО «Маяк» (для проведения сравнительного анализа с ситуацией на реке Клинч, Ок-Ридж)». Общий посыл исследования заключался в демонстрации гибкости решений по радиационной защите на примере двух ситуаций — состояния Теченского каскада водоемов (ТКВ) и радиационных загрязнений реки Клинч-Ривер (США). Это предварительное, но детальное изучение проблематики ТКВ во многом предопределило активное участие специалистов ИБРАЭ РАН в рассмотрении и определении путей решения проблемы долгосрочной безопасности каскада в последующие 20 лет. Одновременно IIASA реализовывался первый проект международного рассмотрения практики за-



3-D модель долгосрочного прогноза динамики состояния ТКВ



Этапы жизненного цикла ТХВ

качки жидких РАО, который спустя пятнадцать лет в соответствии с поставленным государственным заданием также стал одним из крупных исследовательских проектов Института.



Выступление д.т.н. Уткина С. С. на Международном общественном форуме-диалоге «АтомЭко-2017»

В марте 2003 года вышло поручение Президента России В.В. Путина, требующее «...разработать комплекс дополнительных мер, направленных на предотвращение угрозы экологической катастрофы на Теченском каскаде водоемов ФГУП «ПО «Маяк». Минатомом России была организована разработка «Комплексного плана мероприятий по решению экологических проблем, связанных с текущей и прошлой деятельностью ФГУП «ПО «Маяк». Научную часть программы возглавил ИБРАЭ РАН. В работе, проходившей под руководством Л.А. Большова и И.И. Линге, принимали участие ведущие и авторитетнейшие специалисты Минатома России, ФГУП «ПО «Маяк», Российской академии наук, Минприроды России, ФМБА России. Работы в соответствии с «Комплексным планом...» начали выполняться уже в 2005 году, но в полном объеме его реализация стала возможна только в рамках федеральной целевой программы «Обеспечение ЯРБ на 2008 год и на период до 2015 года» (ФЦП ЯРБ). Впоследствии был разработан Стратегический мастер-план комплексного решения проблем ТХВ (СМП ТХВ), который основывается на наиболее рациональном и эффективном использовании материально-финансовых ресурсов при соблюдении отечественных и международных требований в области радиационной и экологической безопасности. СМП ТХВ, утвержденный 15.02.2016 г. генеральным директором Госкорпорации «Росатом», заложила прочную научную основу для стабилизации ситуации вокруг ТХВ и определил самую эффективную стратегию окончательного решения данной проблемы.

В настоящее время ИБРАЭ РАН активно ведет работы по научно-техническому и экспертному сопровождению практической реализации мероприятий, предусмотренных мастер-планом. В частности, в рамках реализации СМП ТХВ разработан расчетный инструмент «ТХВ-Прогноз», который предназначен для оценки опасных по-

следствий для различных сценариев управления гидротехническими сооружениями объекта в различных климатических условиях. Результаты выполненных расчетов позволили организовать комплексные мероприятия, направленные на самоочищение водоемов, а также сравнить различные стратегии управления сооружениями ТКВ и оценить их эффективность.

Стратегический мастер-план исследований в обоснование безопасности сооружения, эксплуатации и закрытия пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов

Изоляция в глубоких геологических формациях в настоящее время считается наиболее приемлемым методом обращения с высокоактивными отходами (ВАО), способным минимизировать их негативное воздействие на человека и объекты окружающей среды в течение периода потенциальной опасности. Мировой опыт показывает, что создание пунктов глубинного захоронения РАО (ПГЗРО) — чрезвычайно сложная проблема, требующая длительных и масштабных усилий по разработке научно-технических основ и инструментария для оценки и обоснования долговременной безопасности, а также неизбежной оптимизации характеристик объекта.

Характеристики необходимых для принятия решений исследований (масштаб, наукоемкость, разнородность и взаимосвязанность) традиционно таковы, что ни одна организация в отдельности ни в одной стране не обладает всеми необходимыми компетенциями, в связи с этим в 2016 году директором по государственной политике в области РАО, ОЯТ и ВЭ ЯРОО Госкорпорации «Росатом» было признано целесообразным консолидировать вопросы научно-технического сопровождения создания ПГЗРО в Нижнеканском массиве горных пород (на глубине около 500 м) в формате СМП исследований по долговременной безопасности (СМП НКМ). Необходи-

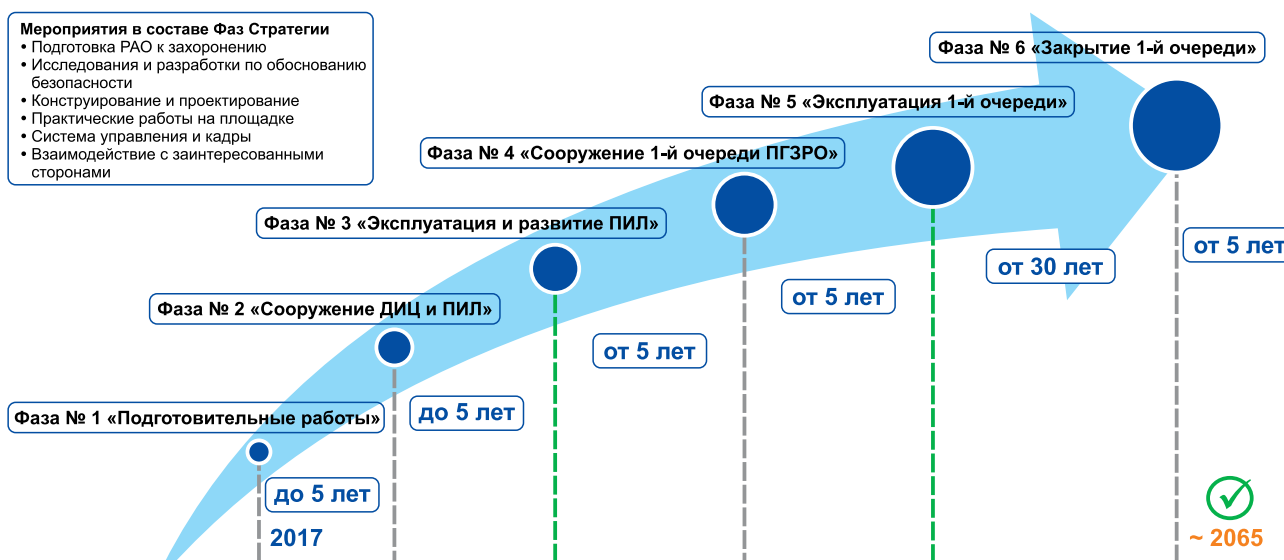


*Итоговый отчет по СМП решения проблем Теченского каскада водоемов
ФГУП «ПО «Маяк», 2016 г.*

Разработчики СМП НКМ

Слева направо: Казаков К. С., Савельева-Трофимова Е. А., Мамчиц Е. Г., Блохин П. А., Ведерникова М. В., Баринов А.С., Бирюков Д. В., Самойлов С. А., Уткин С. С., Линге И. И., Дорогов В. И., Приходько А. В., Линге Ин. И., Иванов А. Ю.





Фазы реализации стратегии

димо отметить, что методология стратегического планирования успешно себя зарекомендовала применительно к таким комплексным и долговременным проектам, как утилизация объектов атомного подводного флота на Северо-Западе России и перевод в безопасное состояние ТКВ ФГУП «ПО «Маяк».

СМП НКМ в рамках горизонта планирования 2070 г. (как рационально минимальный срок принятия решений по закрытию ПГЗРО) позволит: итерационно (в соответствии с необходимостью) оптимизировать проектные и эксплуатационные параметры подземной исследовательской лаборатории (ПИЛ) и ПГЗРО; разработать и осуществлять сопровождение программы исследований и программы подготовки РАО к захоронению; готовить обоснования долговременной безопасности ПГЗРО для российских регуляторов и международных экспертов.

Разработка инструментария для научно-технической поддержки и обоснования безопасности проекта ПЗГРО НКМ в рамках реализации СМП НКМ

В обосновании безопасности пункта окончательной изоляции РАО важную роль играют задачи моделирования долговременной эволюции объекта при помощи расчетных кодов, результаты которых являются критичными для проектных решений в области обеспечения долговременной безопасности захоронения. Специалистами ИБРАЭ РАН осуществляется

разработка целого ряда программных инструментов, предназначенных для решения указанных задач. Эта работа проводится в тесном взаимодействии различных подразделений и лабораторий Института, благодаря чему обеспечиваются мультифизичность и комплексный характер исследований.

Анализ изменения свойств ИББ. Разработан инструмент DESTUCT для анализа изменения свойств инженерных барьеров безопасности (ИББ) в результате эволюции материалов. С его применением выполняется расчет миграции радионуклидов с учетом физических, химических и тепловых процессов, оцениваемых на основе результатов исследований теплофизических свойств материалов, полученных в лаборатории прикладной механики сплошных сред ИБРАЭ РАН.

Расчетная оценка радиационных характеристик ОИАЭ и радиационного воздействия. Расчеты и оценки с учетом переноса гамма и нейтронного излучения в трехмерной геометрии могут быть выполнены с применением разработанных в ИБРАЭ РАН современных ПК CORIDA. Для задач оценки радиационных характеристик остеклованных ВАО используется опыт лаборатории разработки интегральных расчетных кодов по созданию твэльного кода нового поколения БЕРКУТ.

Геомиграция радионуклидов. В рамках научно-технической поддержки СМП НКМ специалистами лаборатории геомиграционного моделирования ИБРАЭ РАН с использованием кода GeRa реализован расчет миграции радионуклидов в геологи-

ческой среде с учетом нестационарных граничных условий, влияния гидрологических объектов, геологических неоднородностей, техногенных объектов и пр. Содержание радионуклидов на выходе из инженерных барьеров безопасности определяется на основе исследований деградации ИББ в лаборатории методологии обоснования безопасности.

Расчет тепловых полей и их влияния на прочность конструкции ПЗРО. Специалистами лаборатории прикладной механики сплошных сред ИБРАЭ РАН разработан 3D конечно-элементный код FENIA для оценки процессов распределения тепловой нагрузки и механической прочности элементов конструкции ПЗРО с учетом результатов расчетного исследования эволюции материалов барьеров безопасности, полученных в лаборатории методологии обоснования безопасности Отделения анализа долгосрочных рисков в сфере обеспечения ЯРБ. В результате расчета получены данные об изменениях температурного поля внутри ПЗРО и в окружающей горной породе на период до 10000 лет.

Анализ неопределенностей и оценка достоверности результатов моделирования. Специалистами лаборатории геостатистического моделирования ИБРАЭ РАН разработаны программные инструменты (MOUSE) для анализа неопределенностей и оценки достоверности результатов при выполнении расчетно-прогностического моделирования по обоснованию безопасности объектов ядерного наследия и пунктов захоронения РАО. Реализуются механизмы обеспечения взаимосвязанной работы всех описанных выше расчетных комплексов с использованием единых исходных данных и достижения результатов комплексного решения.

Система управления знаниями в рамках СМП НКМ. В настоящее время в рамках работ по практической реализации СМП НКМ разрабатывается специальная система PULSE (Project of the Underground Laboratory Scientific Escort), являющейся прообразом будущей базы знаний по проекту ПЗРО в Нижнеканском массиве и виртуальной ПИЛ. В базе знаний PULSE систематизируются информация о проекте, сопроводительные документы и литературные источники по тематике проекта создания ПЗРО (более 1000 документов), требования МАГАТЭ и Ростехнадзора к различным стадиям реализации проекта ПЗРО (более 350 документов), зарубежные отчеты по реализации сходных проектов (более 900 документов) и много другой релевантной научно-технической информации. По мере реализации этапов проекта информация в базе знаний продолжает накапливаться.

Вектор развития PULSE — это постепенная интеграция расчетно-программных комплексов, накопленного массива данных, проектных решений и современных технологий в структуру цифровой ПИЛ.

Научная поддержка совершенствования законодательства и нормативно-правового регулирования в области безопасности атомной энергетики

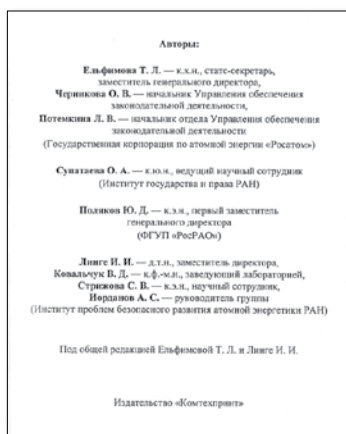
К активному участию в разработке федерального закона по обращению с РАО специалисты ИБРАЭ РАН приступили со второй половины 2007 года, когда стало ясно, что подготовленный в ГК «Росатом» вариант законопроекта не будет поддержан руководством Госкорпорации и необходимо сформировать его новое видение. Содержательная работа по законопроекту стартовала в самом конце 2007 года. Ядро разработчиков составили Линге И. И., Ковальчук В. Д., Стрижова С. В., Абалкина И. Л. (ИБРАЭ РАН), Супатаева О. А. (ИГП РАН). Важный вклад в его замысел внесли дискуссии и обсуждения с Агаповым А. М. (Госкорпорация «Росатом»), Брыкиным С. Н. (ВНИИХТ), Шарафутдиновым Р. Б. (ФБУ «НТЦ ЯРБ»). Уже в марте 2008 года материалы по законопроекту были доложены руководству отрасли и поддержаны им. На последующих этапах активное и решающее участие в прохождении законопроекта обеспечили Ельфимова Т. Л. и Поляков Ю. Д.

Параллельно работе над законопроектом проводились оценки параметров существовавшей и перспективных систем обращения с РАО. Большое значение здесь имело сотрудничество ИБРАЭ РАН со шведской компанией SKB-IC (специализированная компания, ответственная за обеспечение безопасного обращения с РАО за пределами площадки АЭС, включая транспортировку и окончательное захоронение). В рамках этого сотрудничества в 2009–2011 гг. были организованы семинары, на которых специалисты SKB-IC делились опытом Швеции и других стран в области захоронения РАО, включая сформировавшуюся систему финансирования захоронения РАО, подходы к анализу безопасности объектов захоронения РАО, принятую классификацию РАО для целей захоронения. Участие в этих семинарах позволило специалистам ИБРАЭ РАН и ряда организаций Госкорпорации «Росатом» глубоко и всесторонне изучить опыт других стран по обращению с РАО и на этой основе совместно с отраслевыми специалистами разработать «Дорожную карту создания Единой государственной системы обращения с РАО».



Стрижова Софья Валерьевна

к.э.н., выпускница ГУУ, с.н.с.,
специализация: мировая экономика,
работает в ИБРАЭ РАН с 2002 г.



Комментарий к Федеральному закону
№ 190-ФЗ

После почти полуторалетнего обсуждения в Федеральном Собрании Государственной Думы РФ закон № 190-ФЗ «Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» был принят и 15 июля 2011 года вступил в силу.

Эта работа существенно обогатила опыт знакомства с процессами, сопровождавшими рассмотрение законопроекта. Появилось понимание хрупкости, сложности и уязвимости сформированной законодательной базы в отношении ряда обстоятельств. Во-первых, в отношении ведомственных инициатив: к этому времени уже почти два года велись дискуссии вокруг примененных в ОСПОРБ-1999/2010 критериев отнесения жидких и газообразных отходов к РАО, которые предполагали одинаковые с твердыми РАО значения удельных активностей и требование обязательного отверждения. В качестве выхода из сложившейся ситуации была применена формула вынесения базовых критериев на уровень постановлений Правительства, но опыт показал, что и этот вариант не лишен недостатков. Во-вторых, это предварительная оплата захоронения РАО, которая применяется за рубежом, но в нашей стране не обеспечена щадящим финансовым режимом. В-третьих, это независимость национального оператора от организаций, в результате деятельности которых образуются РАО. Основной причиной несовершенства нормативного поля в данной области видится выбранный разработчиками вариант совместной подготовки пакетов нормативных актов по критериям (отнесения отходов к РАО, отнесения к особым РАО, классификации РАО), а не их последовательное и взаимосвязанное раскрытие.

Осенью 2012 года, накануне рассмотрения проекта постановления о критериях, Институт направил письмо в Правительство РФ, в котором констатировал, что «возможных негативных последствий установления невыверенных критериев и классификаций несколько. Во-первых, это принуждение организаций к неоправданным затратам без повышения безопасности, что полностью противоречит принципам радиационной защиты. В целом по стране речь может идти о многих миллиардах рублей ежегодно. Во-вторых, это торможение создания современной системы обращения с РАО. Период функционирования российской атомной энергетики и промышленности в режиме накопления РАО был очень продолжительным, и неправильно было бы затягивать его далее. Многие аспекты обращения с РАО указывают, что возможности функционирования отрасли с недоуведенными до современных кондиций системами по завершающим стадиям жизненного цикла серьезно ограничены во времени». Предлагались важные изменения в обсуждаемый документ. Из них в силу временных ограничений было детально рассмотрено и принято Правительством лишь одно — по критериям отнесения к жидким РАО.

Участие в создании новой нормативно-правовой базы обращения с РАО, направленной на формирование Единой государственной системы обращения с отходами, является одним из значимых направлений деятельности Института. В частности, Институт оказывал информационную и методическую поддержку эксплуатирующим организациям и Госкорпорации «Росатом» при проведении первичной регистрации накопленных РАО (2013–2014 гг.). Благодаря организации межотраслевого взаимодействия и подключения к работе большого количества ведущих специалистов из различных сфер деятельности, а также более десятка промышленных предприятий,

в крайне сжатые сроки была успешно решена ключевая задача первичной регистрации — разработаны методы оценок доз, рисков, затрат и ущерба окружающей среде, необходимых для обоснования отнесения РАО к особым. Разработанные эксплуатирующими организациями обоснования дали возможность комиссиям принять взвешенные решения по отнесению особым радиоактивных отходов, размещенных на площадках более чем 70 объектов.

Возможность обсуждения вопросов безопасного обращения с РАО с ведущими специалистами России с ориентацией на мировой опыт и реальное знакомство с ним — один из источников динамичного развития ИБРАЭ РАН. В рамках данной деятельности проводится анализ нормативно-правовых требований по обращению с РАО на предмет соответствия лучшим международным практикам, а также анализируется практическая деятельность на предприятиях ЯТЦ.

Продолжаются работы по подготовке изменений в Федеральный закон «Об обращении с РАО» и Постановление Правительства РФ от 19 октября 2012 г. № 1069 «О критериях отнесения твердых, жидких и газообразных отходов к радиоактивным отходам, критериях отнесения радиоактивных отходов к особым радиоактивным отходам и к удаляемым радиоактивным отходам и критериях классификации удаляемых радиоактивных отходов». Одной из перспективных задач, решаемых в настоящее время, являются работы по определению направлений оптимизации технологических процессов обращения с РАО и анализу радионуклидного состава РАО в контексте долгосрочной безопасности и разработки критериев приемлемости РАО.

Исследование возможности использования атомных станций малой мощности (АСММ) для отдаленных и энергоизолированных потребителей

Проведенные в ИБРАЭ РАН исследования радиационной и экологической безопасности первой в мире плавучей атомной теплоэлектростанции (ПАТЭС) с учетом более чем 50-летнего опыта эксплуатации атомных ледоколов, кораблей ВМФ и обеспечивающей их инфраструктуры послужили в 2009 году отправной точкой для организации фундаментальных исследований и мероприятий, направленных на ликвидацию дефицита внимания к перспективному направлению в энергетике — атомным станциям малой мощности (АСММ). В рамках данного научного направления под руководством академика РАН А.А. Саркисова проводятся комплексные исследования по определению возможностей безопасного и экономически эффективного использования малой атомной энергетики в составе локальных энергосистем России.

В 2011 году была инициирована и проведена межотраслевая межрегиональная научно-техническая конференция «Перспектива развития системы АСММ в регионах, не имеющих централизованного электроснабжения». В работу конференции были вовлечены органы исполнительной власти, ключевые отраслевые организации и академические институты. По ее итогам была подтверждена актуальность направления, продемонстрирован интерес ГК «Росатом», Министерства энергетики, МО РФ и других государственных структур к возможностям применения АСММ.



Смоленцев Дмитрий Олегович

н.с. лаборатории системного и стратегического анализа ядерной и экологической безопасности



Сборник материалов межотраслевой конференции «Перспектива развития системы атомных станций малой мощности в регионах, не имеющих централизованного электроснабжения», 2010 г.



Сборник материалов международной конференции «Атомные станции малой мощности — актуальное направление развития атомной энергетики», 2013 г.



Межрегиональная научно-техническая конференция «Перспектива развития системы АСММ в регионах, не имеющих централизованного электроснабжения», 2011 г.

В подтверждение значимости малой атомной энергетики в 2013 году при поддержке МАГАТЭ, РАН, РФФИ и ГК «Росатом» была проведена международная конференция «Атомные станции малой мощности — актуальное направление развития атомной энергетики». Важность темы и большие возможности для применения АСММ были подтверждены на международной арене. Обобщенные материалы конференций, представляющие фундаментальные знания по созданию и развитию системы атомной энергетики малой мощности на всех этапах жизненного цикла, изданы в двухтомном сборнике трудов «Атомные станции малой мощности: новое направление развития энергетики» под редакцией академика РАН А. А. Саркисова. Эта публикация заполнила пробел в отечественной научной литературе систематическим представлением современного состояния и путей развития малой атомной энергетики, о чем свидетельствует тот факт, что большинство издаваемых статей по тематике АСММ в отечественной научной литературе ссылается на эти книги.

Члены Президиума международной конференции «Атомные станции малой мощности — актуальное направление развития атомной энергетики», 2013 г.



Основным заказчиком научных исследований по направлению АСММ выступает РФФИ. На начальных стадиях реализован проект «Разработка математических моделей сравнительной оценки эффективности создания и использования перспективных энергоустановок малой мощности с целью разработки концепции и обоснования стратегии развития малой энергетики в регионах страны, не имеющих централизованного электроснабжения». Работы были продолжены в 2012–2015 гг. в рамках проекта «Исследование фундаментальных основ использования атомных станций малой мощности в энергетической системе России как нового направления в развитии атомной энергетики». В результате исследований была подтверждена востребованность и технико-экономическая эффективность использования АСММ с учетом современных требований к развитию конкурентоспособной малой атомной энергетики: серийного изготовления энергоустановок и централизации инфраструктуры обращения с ними.

Сегодня АСММ является стратегическим направлением программ инновационного развития ГК «Росатом», научно-технического и производст-



венно-технологического развития арктических территорий. Прорабатываются пилотные проекты АСММ в интересах Минобороны, малая атомная энергетика рассматривается как важный фактор повышения национальной безопасности. На текущий момент существует более 20 проектов отечественных атомных энергоисточников малой мощности, находящихся на различных стадиях реализации (от эскизных проектов до завершения строительства, начала испытаний). Флагманом современных АСММ по праву считается ПАТЭС «Академик Ломоносов», ввод в эксплуатацию которой запланирован в г. Певек на 2019 г., где станция заместит располагающиеся в одной изолированной энергосистеме Билибинскую АЭС и Чаунскую ТЭЦ.

Текущий этап работ проводится при поддержке РФФИ (проект № 17-08-00947-а) и ориентирован на исследование фундаментальных основ использования атомных станций субмегаваттного класса для энергоснабжения изолированных потребителей арктических территорий РФ. Определены подходы и выполнена оценка экономической эффективности применения АСММ мегаваттного класса, предельной стоимости сооружения. Основанные на принципе максимальной автономности в процессах сооружения, эксплуатации, вывода из эксплуатации, обращения с ОЯТ атомные энергоисточники мегаваттного класса имеют высокий потенциал применения в Арктике как с точки зрения потребности в них, так и с точки зрения экономической эффективности. Предложенные подходы и полученные результаты могут быть использованы на всех стадиях проектирования атомных энергоисточников для контроля сохранения их конкурентоспособности.

В качестве дальнейших исследований планируется рассмотрение перспективы, целесообразности, безопасности и социальной приемлемости использования объектов малой атомной энергетики для энергообеспечения потребителей в арктической зоне. Целесообразно проведение обоснования их безопасности и минимизации негативного воздействия радиоэкологических факторов на окружающую среду и человека даже в условиях чрезвычайных ситуаций.

Совместное заседание Научно-технической коллегии ИП «НТЭС ЕЭС» и Секции по проблемам надежности и безопасности больших систем энергетики Научного совета РАН по системным исследованиям в энергетике на тему «Возможности применения АЭС малой мощности для энергоснабжения гражданских потребителей» и протокол заседания № 7/16. 17.11.2016 г.

Начало буксировки плавучего энергоблока к месту базирования (фото информагентства Deutsche Welle)



Ликвидация последствий радиационных аварий. Создание научных основ и разработка систем радиационного мониторинга и аварийного реагирования



С 1996 года ИБРАЭ РАН является активным участником работ в рамках национальной системы аварийного реагирования в случае кризисных ситуаций на ядерно и радиационно опасных объектах, осуществляя научно-техническую поддержку мероприятий по защите населения и территорий при возможных радиационных авариях. ЦНТП ИБРАЭ РАН включен в состав сил и средств постоянной готовности федерального уровня единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций, утвержденный постановлением Правительства Российской Федерации от 8 ноября 2013 г. № 1007.



ИБРАЭ РАН развивает следующие научные направления в сфере радиационного мониторинга и аварийного реагирования:

- проводит фундаментальные и прикладные исследования по моделированию распространения радионуклидов в воздушной и водной средах;
- разрабатывает программно-технические комплексы для оценки, анализа и прогноза радиационных последствий нештатных/чрезвычайных ситуаций радиационного характера;
- разрабатывает и оптимизирует структуру автоматизированных систем контроля радиационной обстановки, создает аппаратно-программное обеспечение для них;
- разрабатывает мобильные комплексы радиационного мониторинга и радиационной разведки;
- участвует в практической реализации создания и развития объектовых и территориальных АСКРО на основе разработанных в ИБРАЭ моделей, программных кодов и геоинформационных систем;
- принимает активное участие в проведении регулярных противоаварийных учений, в т.ч. международных;
- обеспечивает через Центр научно-технической поддержки ИБРАЭ РАН научно-техническую и экспертную поддержку мероприятий по аварийному реагированию на ЧС с радиационным фактором, осуществляемых на отраслевом, региональном и федеральном уровнях.

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ИБРАЭ РАН В ОБЛАСТИ АВАРИЙНОГО РЕАГИРОВАНИЯ И РАДИАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА



Арутюнян Рафаэль Варназович

д.ф.-м.н., заместитель директора ИБРАЭ РАН,
руководитель ЦНТП ИБРАЭ РАН

«История создания ИБРАЭ берет свое начало с деятельности экспертной группы ученых-физиков, которая под руководством Большова Л. А. приняла активное участие в решении задач прогнозирования поведения ядерного топлива в 4-м энергоблоке ЧАЭС и в выработке ряда практических мер в ходе ликвидации аварии на Чернобыльской АЭС. В дальнейшем эта группа экспертов составила ядро нового Института, организационная структура и основные направления деятельности которого были во многом обусловлены результатами осмысления чернобыльского опыта. Поэтому вопросам аварийного реагирования в ИБРАЭ РАН всегда уделялось и уделяется особое внимание».

Современный этап развития атомной отрасли характеризуется выходом на качественно новый уровень развития систем и методик обеспечения безопасности ядерных объектов и технологий, благодаря чему удается существенно снизить риски аварий и чрезвычайных ситуаций (ЧС) с радиационным фактором. Вместе с тем, все более широкое использование источников ионизирующего излучения в энергетике, промышленности, науке и медицине ведет к тому, что эти риски в значительной степени сохраняются. Специфика последствий ЧС радиационного характера обусловлена следующими факторами:

- радиационные аварии происходят довольно редко, что негативно влияет на уровень практической профессиональной подготовки специалистов соответствующих служб;
- решение задач оценки, прогноза и выработки рекомендаций усложняется вследствие их высокой наукоемкости и междисциплинарности;
- чрезвычайные ситуации характеризуются быстрым вовлечением в них большого количества людей с гипертрофированно обостренным восприятием радиации как фактора опасности, что требует быстрого и адекватного реагирования со стороны специалистов противоаварийных служб.

Опыт развития отечественной и мировой атомной энергетики дает основания утверждать, что одним из ключевых факторов обеспечения безопасности ядерно и радиационно опасных объектов (ЯРОО) является создание и оптимизация системы радиационного мониторинга и аварийного реагирования на чрезвычайные ситуации. Такая система предполагает наличие специализированных противоаварийных структур, организацию взаимодействия и оперативного обмена информацией между ними и органами государственной власти всех уровней, организацию научно-технической и экспертной поддержки принятия решений.

Одним из основных направлений реализации «Основ государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности Российской Федерации на период до 2025 года» определено развитие научно-производственного потенциала и его поддержание на уровне, обеспечивающем эффективность технических решений по минимизации рисков при использовании ядерных технологий. Это обуславливает необходимость постоянного совершенствования систем радиационного мониторинга и аварийного реагирования.



К основным факторам, определяющим их эффективность, относятся:

- координация работы уполномоченных структур, осуществляющих функции аварийного реагирования, и органов власти на муниципальном, региональном и федеральном уровнях;
- наличие специализированных центров, оперативно оказывающих квалифицированную научно-техническую и экспертную поддержку уполномоченным структурам и органам власти в принятии решений по защите населения и объектов окружающей среды;
- наличие автоматизированных систем радиационного контроля и высокотехнологичных программно-аппаратных комплексов оценки и прогнозирования ЧС с радиационным фактором;
- организация единого информационного пространства, обеспечивающего взаимодействие всех участников системы аварийного реагирования.

Визит в Центр научно-технической поддержки ИБРАЭ РАН японской делегации во главе с заместителем начальника отдела контроля за вооружениями и разоружением Министерства иностранных дел Японии 2-ном Кодзи Канэто. Дискуссия о сотрудничестве по развитию системы радиационного мониторинга и аварийного реагирования на Дальнем Востоке России

Директор ИБРАЭ РАН Большов Л. А. докладывает Премьер-министру Путину В. В. о системах радиационного мониторинга (2008 г.)

Системы радиационного мониторинга: базовые сведения

С точки зрения минимизации последствий радиационных аварий на АЭС и других ЯРОО, основополагающее значение имеет оперативность принятия решений и проведения мероприятий по защите населения и окружающей среды. Это обуславливает необходимость создания эффективных систем мониторинга радиационной обстановки в ближней и дальней зонах ЯРОО с применением современных аппаратно-программных средств и информационных технологий.





Гаврилов Сергей Львович

заведующий отделением
научно-технических проблем развития
комплексных систем мониторинга

«В ИБРАЭ РАН накоплен уникальный 20-летний опыт разработки и создания систем радиационного мониторинга как на объектах использования атомной энергии, так и на территориях регионов Российской Федерации.

В настоящее время Институт обладает всеми компетенциями в данной области для внедрения систем мониторинга «под ключ» — что включает в себя техническое проектирование, разработку архитектуры и принципов построения систем приема, обработки и передачи данных, наладку и ввод в эксплуатацию измерительного оборудования с помощью собственного программного обеспечения, обучение персонала».

ИБРАЭ РАН совместно с НПП «Доза» и ЗАО «НПЦ «Аспект» проводит работы по созданию автоматизированных систем контроля радиационной обстановки (АСКРО) и разработке единых технических требований к таким системам с целью их унификации в соответствии с российскими и международными нормами. Основу АСКРО составляют стационарные измерители мощности амбиентного эквивалента дозы (МАЭД) излучения, необходимость унификации метрологических характеристик которых обусловлена спецификой эксплуатации АСКРО (работа в полевых условиях, требование надежного измерения околофоновых значений МАЭД).

Стационарные системы радиационного мониторинга можно подразделить на два основных класса — объектовые АСКРО, предназначенные для контроля радиационной обстановки на промплощадке ЯРОО и в непосредственной близости от него, и территориальные АСКРО, сфера действия которых охватывает целые регионы. В настоящее время активно развиваются перспективные системы гибридного мониторинга с использованием передвижных радиологических лабораторий и мобильных измерительных комплексов. Такие системы обеспечивают большую, по сравнению со стационарными АСКРО, оперативность управления и принятия решений.

Объектовые АСКРО, разработанные ИБРАЭ РАН

Разработки объектовых АСКРО проводятся ИБРАЭ РАН с 1999 г. Первая из таких систем, созданная в рамках международной программы «АМЕС» (Arctic Military Environmental Cooperation), была введена в эксплуатацию в апреле 2004 г. Она развернута на базе ФГУП «Атомфлот» в Мурманске и предназначена для обеспечения радиационной безопасности при эксплуатации площадки временного хранения отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) атомных подводных лодок российского ВМФ. В систему входят 8 постов контроля мощности дозы гамма-излучения, 2 поста контроля радиоактивного загрязнения воздуха на промплощадке, 3 установки контроля альфа- и бета-радиоактивных аэрозолей в вентиляционных системах, установка контроля радиоактивного загрязнения очищенных сбросных вод и автоматическая метеостанция. Программное обеспечение (ПО) для сбора и передачи данных радиационного мониторинга разработано в ИБРАЭ РАН; ПО для визуализации результатов мониторинга разработано в Норвежском институте энерготехнологий и адаптировано специалистами ИБРАЭ РАН.

В 2008–2011 гг. в рамках федеральной целевой программы специалистами ИБРАЭ РАН совместно с ФГУП «ВНИПИЭТ», НПП «Доза» и ООО «ТехноЦентрсервис» была проведена модернизация АСКРО ФГУП «Атомфлот», с увеличением количества постов радиационного контроля на территории предприятия, в санитарно-защитной зоне и зоне наблюдения и их интеграцией в автоматизированную систему с общим сервером и единым программным обеспечением.

Большинство объектовых АСКРО, спроектированных в ИБРАЭ РАН в рамках федеральных и международных целевых программ, размещено в Мурманской области (СРЗ «Нерпа», пункты хранения реакторных отсеков (филиалы ФГУП «СевРАО») в Гремиех, Сайда-губе, губе Андреева) и Архангельской области

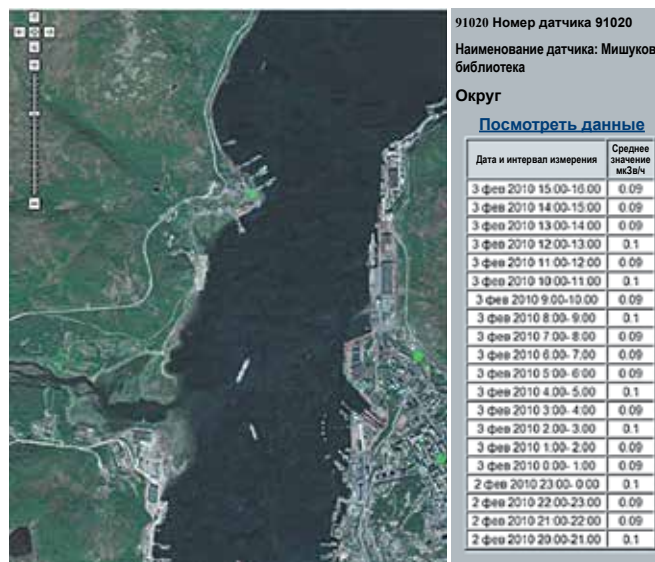


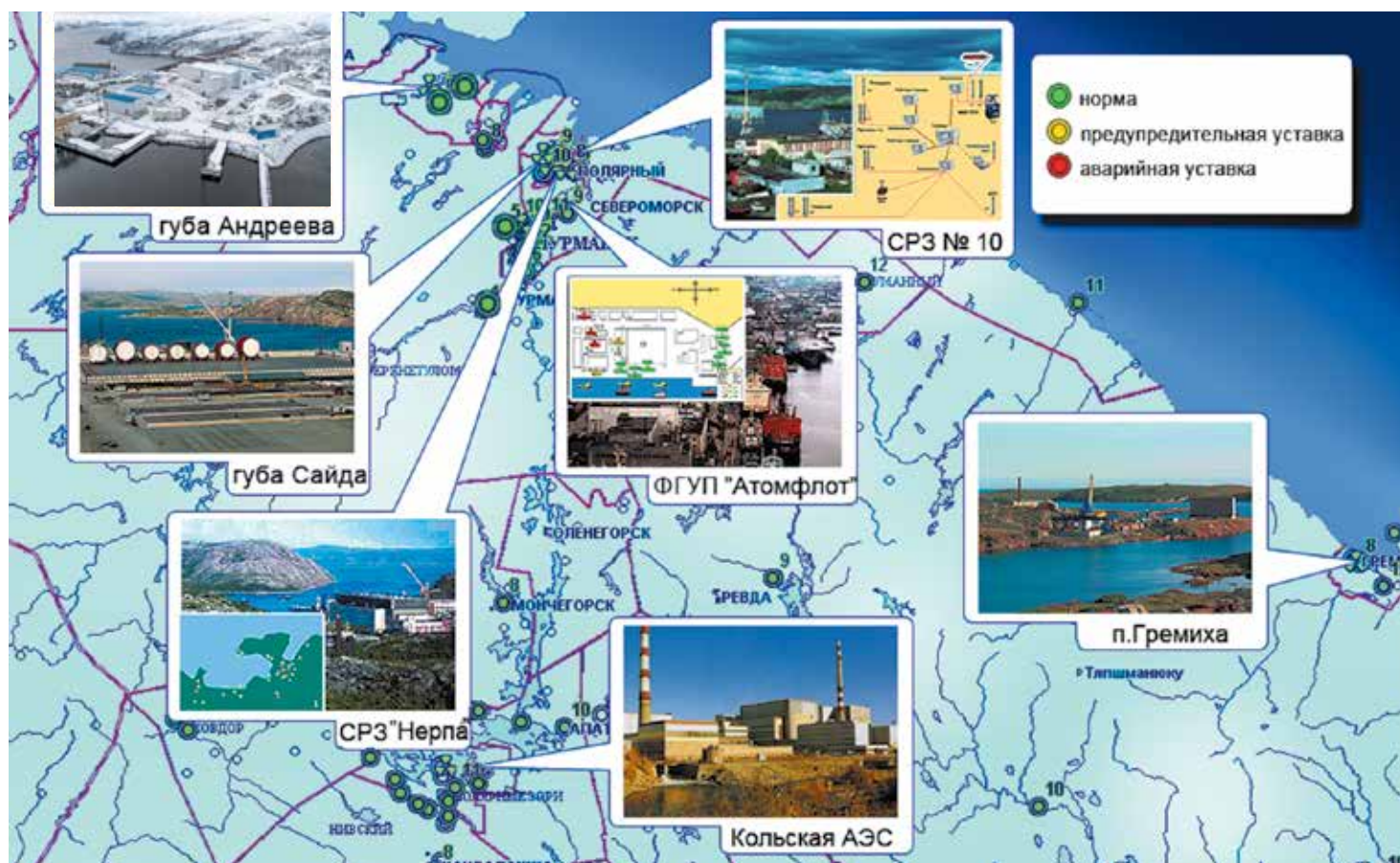
(ОАО «Севмаш», ОАО «ЦС Звездочка») областях, где ведутся масштабные работы по комплексной утилизации объектов российского атомного флота и экологической реабилитации загрязненных территорий и акваторий.

Информация с точек контроля в санитарно-защитной зоне ФГУП «Атомфлот» (окно программы «Монитор оператора»)

Были выполнены работы по созданию и усовершенствованию объектов АСКРО на 12 предприятиях (Минобороны России, Росатом, Минпромторг):

- ФГУП «Атомфлот»
- ФГУП 10 «СРЗ» МО РФ
- ФГУП «СРЗ «Нерпа»
- Филиал 1 ФГУП «СевРАО» — губа Андреева
- Филиал 2 ФГУП «СевРАО» — Гремиха
- Филиал 3 ФГУП «СевРАО» — Сайда-губа
- ОАО «ГНЦ НИИАР»
- ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»
- ОАО «ПО «Севмаш» (2 системы)
- ОАО СРЗ «Звездочка»
- ФГУП «ДальРАО»
- АО «НИИП»





Кроме того, совместно с ФГУП РЯЦ «Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» (ВНИИЭФ) и ГНЦ «Научно-исследовательский институт атомных реакторов» (НИИАР), входящими в структуру Госкорпорации «Росатом», были созданы объектовые АСКРО на территории этих институтов.

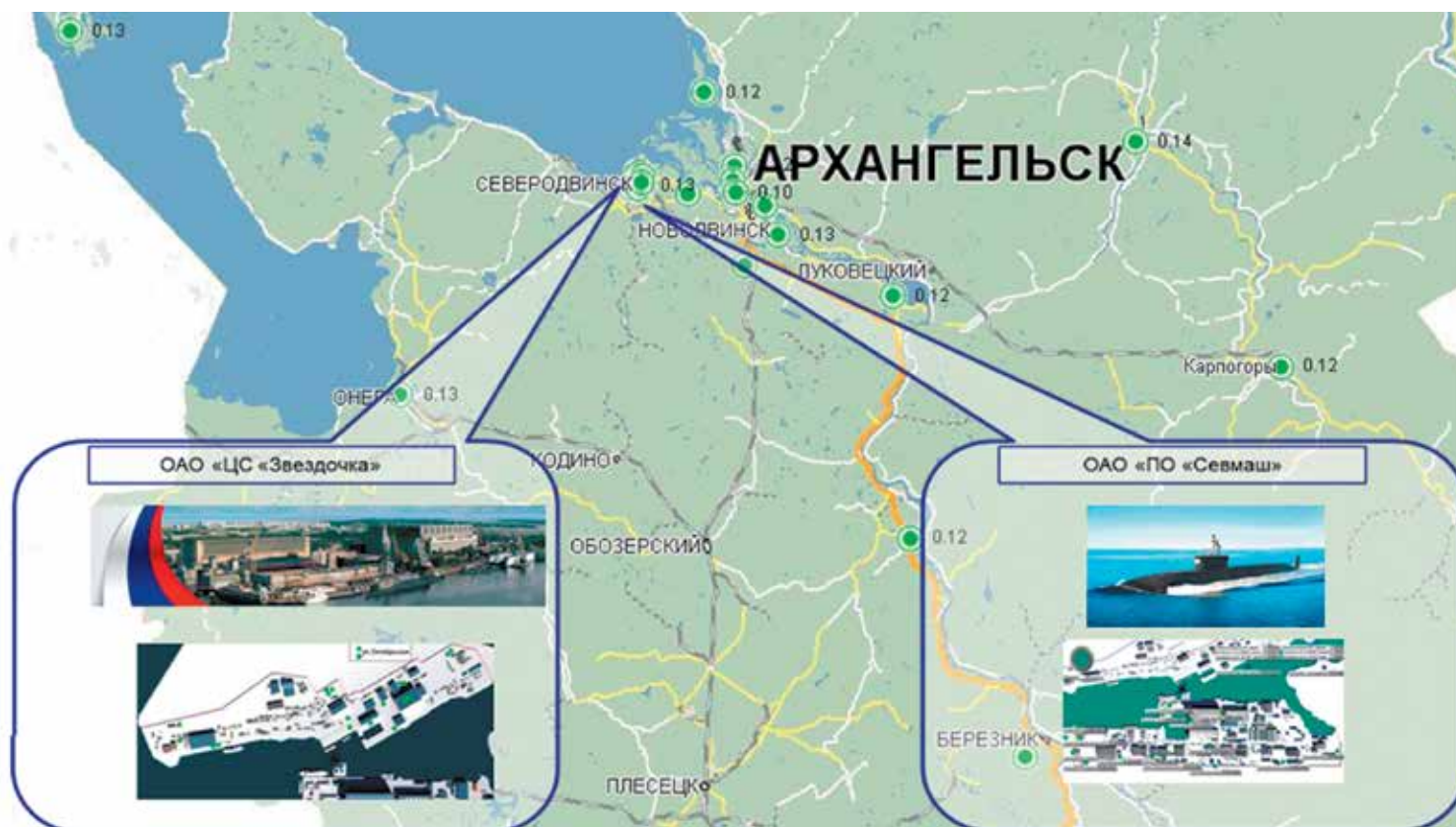
Территориальные АСКРО

Территориальные АСКРО (ТАСКРО) составляют основу системы радиационного мониторинга и аварийного реагирования на чрезвычайные ситуации с радиационным фактором, обеспечивая информационную поддержку действий федеральных и региональных органов исполнительной власти РФ по обеспечению радиационной безопасности населения и окружающей среды. Они проектируются с учетом возможности интеграции в разрабатываемую в соответствии с Федеральной целевой программой Единую государственную автоматизированную систему мониторинга радиационной обстановки на территории Российской Федерации (ЕГАСМРО) и предназначены для непрерывного автоматизированного контроля радиационной обстановки на территории региона или субъекта РФ, сбора, обработки и визуализации оперативных данных о радиационной обстановке, осуществления информационного обмена с другими подсистемами ЕГАСМРО, федеральными, региональными и ведомственными кризисными центрами.

Ядерно и радиационно опасные объекты в Мурманской области

13 — количество объектовых АСКРО, разработанных ИБРАЭ РАН в период 2000–2013 гг. и принятых в эксплуатацию на объектах Министерства обороны РФ, Госкорпорации «Росатом» и других ведомств;

20 — среднее количество постов контроля радиационной обстановки на этих объектах



Структура ТАСКРО

В типовую структуру территориальной системы автоматизированного контроля радиационной обстановки и аварийного реагирования входят центр сбора и обработки информации (ЦСОИ) и стационарные посты радиационного и метеорологического контроля, размещенные в населенных пунктах или на местности. Передача данных от постов контроля в ЦСОИ осуществляется по телефонным линиям, сети Интернет, по беспроводным сотовым и радиоканалам.

Аппаратная часть поста радиационного контроля представляет собой блок детектирования мощности дозы гамма-излучения и блок обработки и передачи данных (БОП), обеспечивающий связь с сервером ЦСОИ и рабочими станциями, предназначенными для отображения результатов мониторинга. К БОП могут также подключаться наружное электронное информационное табло и автоматическая метеостанция (определяет направление и скорость ветра, измеряет атмосферное давление, температуру и относительную влажность воздуха).

В качестве блоков детектирования мощности амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения (МАЭД) в разработанных в ИБРАЭ РАН проектах АСКРО применяются серийно выпускаемые и включенные в государственный реестр средств измерений дозиметры

Ядерно и радиационно опасные объекты в Архангельской области

В Ситуационном центре правительства Мурманской области





Шикин Сергей Александрович

заведующий отделом разработки
и развития комплексных систем
радиационного мониторинга

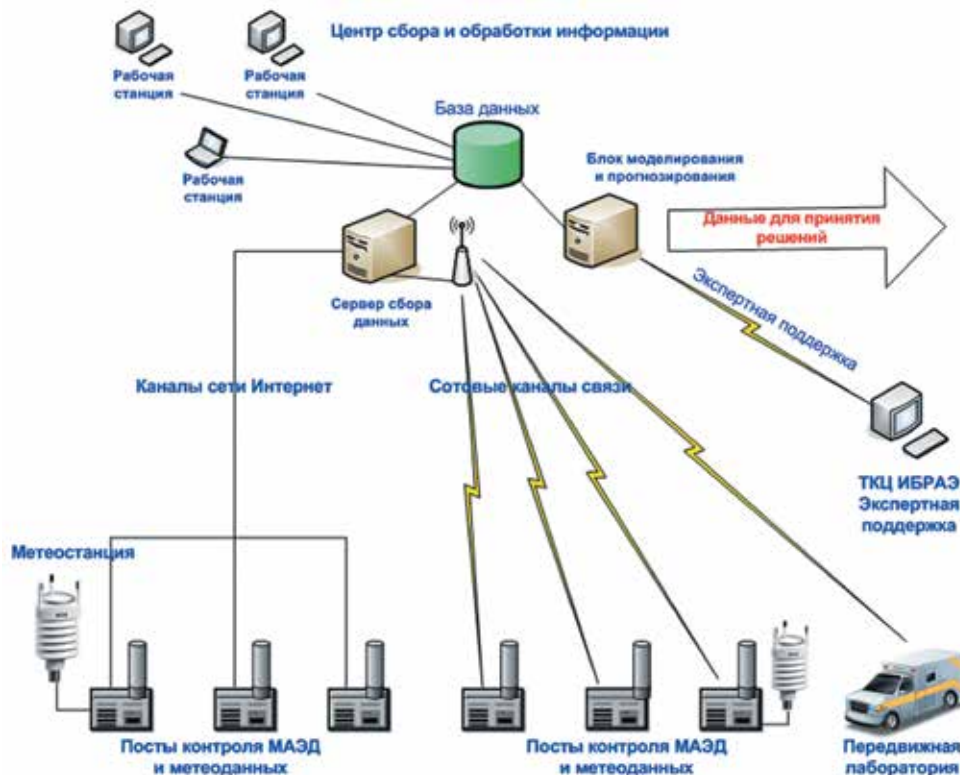
«Оглядываясь на результаты проделанных нами работ в области создания объектовых и территориальных систем радиационного мониторинга, дух захватывает от масштаба и уровня решенных задач. Наши АСКРО функционируют от Смоленска до Камчатки. Необходимо отметить, что внедрения одного лишь автоматизированного контроля радиационной обстановки на объекте или территории без необходимых средств взаимодействия будет мало для создания полноценной системы. Максимальной функциональности АСКРО достигает тогда, когда она объединяет в себе элементы контроля и анализа радиационной обстановки, программные средства оценки ситуаций и, что наиболее важно, систему научно-технической и экспертной поддержки при выработке рекомендаций для принятия решений по адекватному реагированию на аварийные ситуации радиационного характера».

гамма-излучения БДМГ-200, ДБГ-СПД, измерители радиационного фона ИРТ-М (производства НПП «Доза», Зеленоград) и дозиметры УДРГ-50 (НТЦ «Рион»). Они обеспечивают измерение МАЭД в диапазоне $0.1-10^7$ мкЗв/ч с относительной погрешностью не более $\pm 25\%$. Для сбора метеорологических данных применяются сертифицированный автоматический метеокomплекс МК-15 (НПО «Тайфун») либо метеостанция «Vaisala WXT520» (Финляндия), достоинством которой является отсутствие движущихся деталей.

Программное обеспечение ТАСКРО

Разработанное ИБРАЭ РАН программное обеспечение предназначено для сбора и обработки данных, поступающих с локальных постов радиационного контроля ТАСКРО, проверки состояния и автоматического восстановления работоспособности блоков детектирования, ведения базы данных, визуализации (отображения) радиационной обстановки с использованием современных ГИС-технологий, обмена данными с другими системами контроля радиационной обстановки.

Для визуализации в реальном времени результатов контроля радиационной обстановки служит программа «Монитор радиационной обстановки», которая устанавливается на рабочей станции оператора ТАСКРО. Многооконный Windows-интерфейс программы включает в себя панель управления, окно географической карты и окно текущих значений датчиков. Программа позволяет отображать данные о радиа-



Общая схема сбора информации о радиационной обстановке территориальной АСКРО

онной обстановке в графическом и табличном виде с географической привязкой, формировать отчеты и оперативные тренды, контролировать текущее состояние отдельных элементов АСКРО и системы в целом.

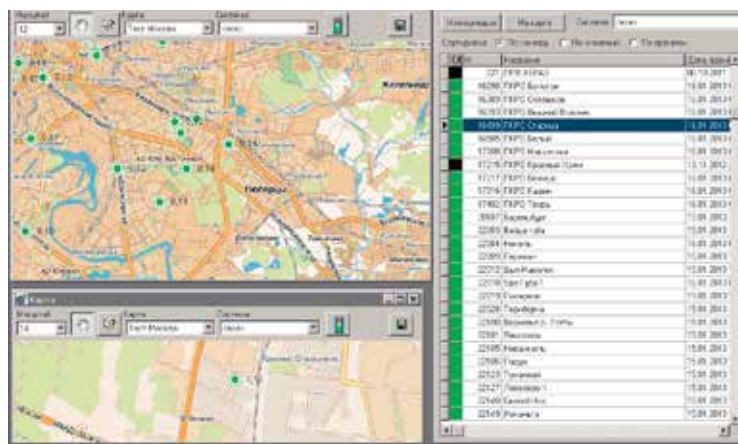
Использование планшетных компьютеров для удаленного мониторинга

Разработанное в ИБРАЭ РАН на базе геоинформационных (GIS) технологий web-приложение «Сервер web-мониторинга» предназначено для установки на мобильных устройствах (планшетных компьютерах и смартфонах) и обеспечивает персоналу центров управления АСКРО возможность осуществлять удаленный мониторинг радиационной обстановки.

ТАСКРО, созданные с участием ИБРАЭ РАН

В 2005–2008 гг. в Мурманской области развернута ТАСКРО, разработанная ИБРАЭ РАН в рамках международного проекта «Усовершенствование системы радиационного мониторинга и аварийного реагирования Мурманской области». В ходе последующей модернизации системы количество контрольных постов мощности дозы гамма-излучения было увеличено до 23, а количество автоматических метеостанций — до 9. Организован взаимообмен данными с расположенными в регионе ведомственными системами радиационного мониторинга (в частности, с АСКРО Кольской АЭС). Центр сбора и обработки информации развернут на базе Мурманского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Предусмотрены каналы передачи данных в Кризисный центр управления МЧС России по Мурманской области (ГУ МЧС) и в Ситуационный центр Правительства Мурманской области.

В 2008–2010 гг. ИБРАЭ РАН выполнял работы по реализации международного проекта «Усовершенствование системы радиационного мониторинга и аварийного реагирования Архангельской области». Была создана территориальная система АСКРО и аварийного реагирования, в которую входят 25 постов контроля МАЭД, две ав-



Многооконный интерфейс программы «Монитор РО»



Вместе плечом к плечу более 25 лет —
Арутюнян Р. В. и Гаврилов С. Л.,
Бакин Р. И. и Киселев А. Е.

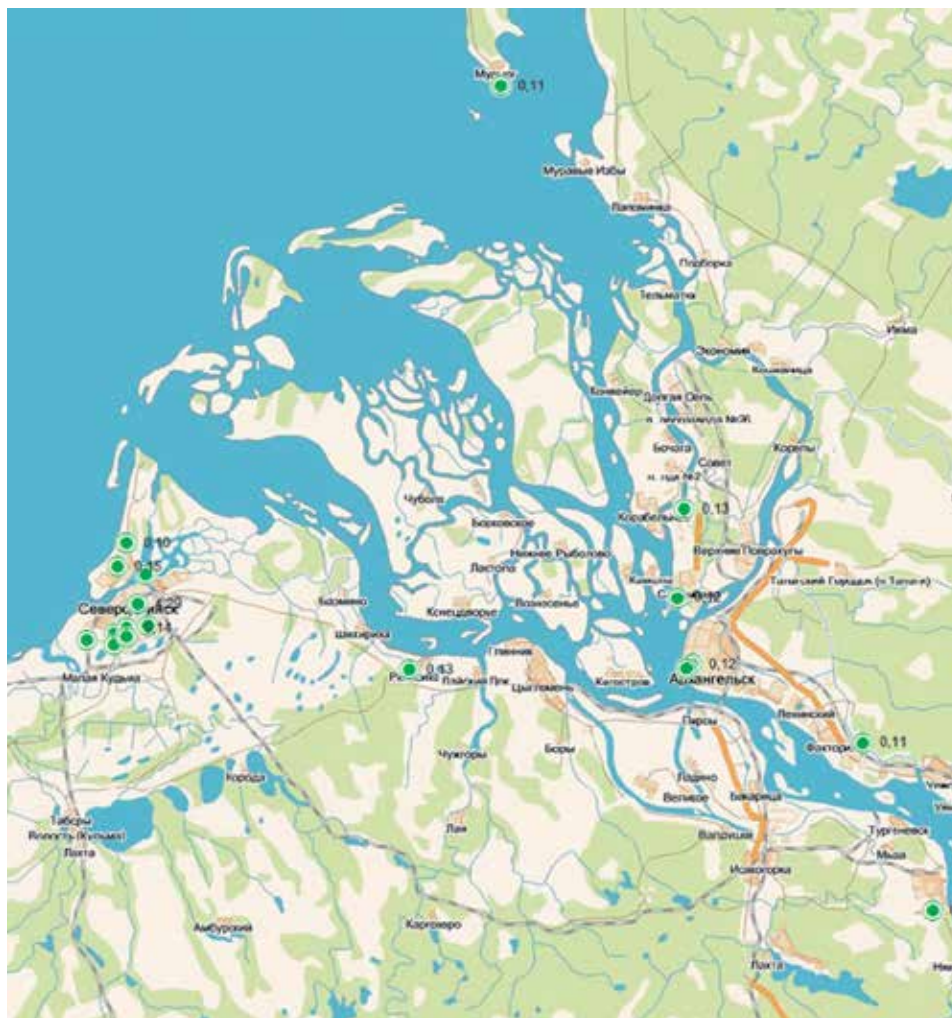


томатические метеостанции и центр сбора и обработки информации (ЦСОИ), размещенный в Архангельском центре по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Данные о радиационной обстановке поступают также в Кризисный центр ГУ МЧС и в Ситуационный центр Правительства Архангельской области.

ТАСКРО Мурманской и Архангельской областей были рекомендованы миссией МАГАТЭ в качестве моделей организации подобных систем в других регионах России. Подводя в июле 2011 г. итоги реализации международного проекта «Усовершенствование системы радиационного мониторинга и аварийного реагирования в Архангельской области», эксперты МАГАТЭ подчеркнули, что проект «...уникален как по количеству участников, так и по охвату территорий. Организация работ по проекту и полученный результат заслуживают самой высокой оценки».

Всего по состоянию на конец 2018 года, в рамках федеральных и региональных программ и других проектов, ИБРАЭ РАН во взаимодействии с Росатомом, МЧС России, администрациями субъектов РФ созданы территориальные системы радиационного мониторинга и аварийного реагирования в 29 субъектах Российской Федерации.

За разработку и внедрение методов и технологий обеспечения радиационной безопасности населения и территорий РФ Арутюнян Р. В. был награжден Премией Правительства РФ в области науки и техники в 2013 г.



Посты контроля Архангельской территориальной АСКРО



Объектовая система на ФГУП «Атомфлот»

ТЕРРИТОРИАЛЬНЫЕ АСКРО, СОЗДАННЫЕ ИБРАЭ РАН



Алтайский край
Архангельская область
Брянская область
Волгоградская область
Воронежская область
Калининградская область
Калужская область
Камчатский край

Красноярский край
Курганская область
Курская область
Ленинградская область
Москва
Московская область
Мурманская область
Нижегородская область

Орловская область
Приморский край
Ростовская область
Саратовская область
Сахалинская область
Свердловская область
Смоленская область
Тверская область

Томская область
Тульская область
Челябинская область
Ульяновская область
Хабаровский край



Сотрудники ИБРАЭ РАН, участвующие в создании территориальных систем радиационного мониторинга и аварийного реагирования и КСМ-ЗН

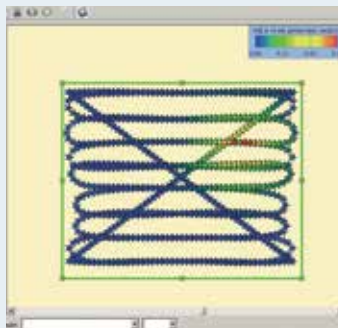
АЭРОГАММАСЪЕМКА НА БАЗЕ БПЛА



Беспилотный летательный аппарат (БПЛА) с анализатором аэрогаммасымки



Специально разработанный легкий гамма-спектрометр УДКГ-А01 для подвески на БПЛА весом 0,6 кг

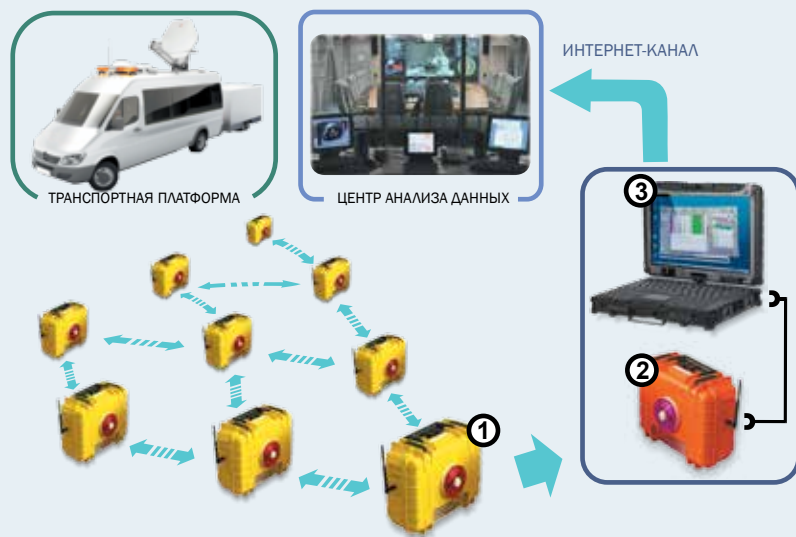


Данные измерений



Результаты обработки измерений специализированным программным обеспечением

БЫСТРОРАЗВОРАЧИВАЕМАЯ АСКРО



ПЕРЕДВИЖНЫЕ РАДИОМЕТРИЧЕСКИЕ ЛАБОРАТОРИИ



Перспективные средства АСКРО

Развитие новых техногенных производств ведет к неуклонному увеличению количества ЯРОО и возрастанию исходящей от них опасности, поэтому при создании АСКРО необходимо применять наиболее эффективные технологии радиационного мониторинга. Исследования ИБРАЭ РАН в области разработки перспективных концепций мониторинга имеют большое научное и практическое значение и могут стать основой для реализации АСКРО нового поколения.

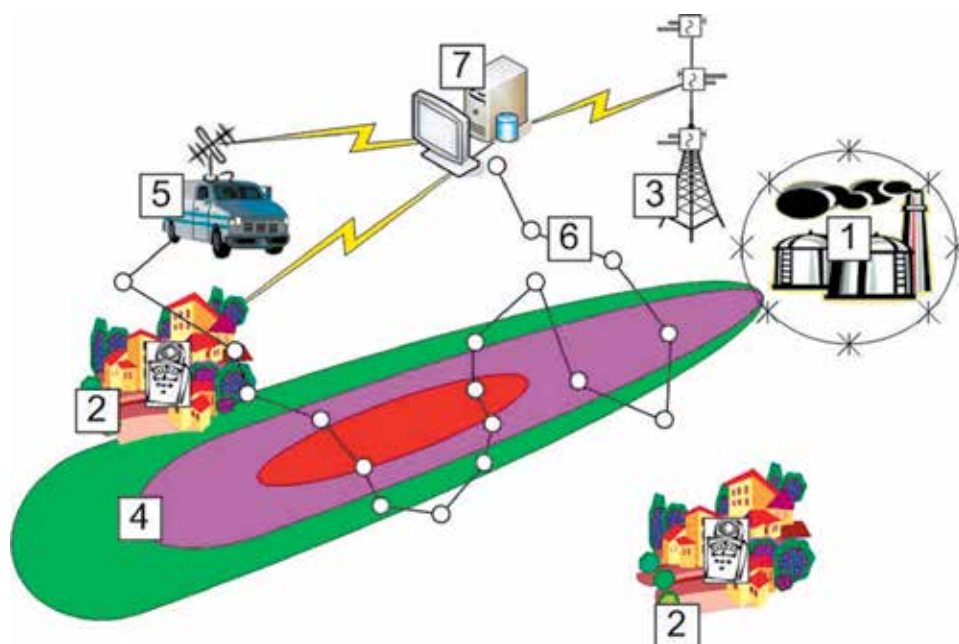
Основные виды перспективных автономных комплексов измерительной гамма-спектрометрической аппаратуры для задач оперативного контроля радиационной обстановки на территории радиационного инцидента или аварии



Антоний Евгений Владимирович

зам. заведующего отделением развития систем аварийной готовности и реагирования

«Для задач научно-технической поддержки систем аварийной готовности и реагирования крайне важно иметь оперативный и надежный доступ к наиболее полной и достоверной информации о случившемся событии. Поэтому при разработке информационных систем мы используем самые современные архитектурные и технические решения, позволяющие обеспечить решение поставленных задач, а также уделяем самое пристальное внимание качеству содержащейся в системах информации, т. к. информационная система сама по себе без качественного ее наполнения не представляет никакой ценности».



Структура гибридного мониторинга: 1 – ЯРОО, 2 – стационарные посты дозиметрического контроля, 3 – стационарная метеомачта в непосредственной близости от ЯРОО, 4 – радиоактивное загрязнение окружающей среды (след) при аварийном выбросе, 5 – ПРЛ, 6 – маршрут движения ПРЛ и точки проведения измерений, 7 – ЦСОИ АСКРО

Гибридный радиационный мониторинг

В концепции так называемого «гибридного» мониторинга АСКРО рассматривается как единый измерительно-расчетный комплекс, обеспечивающий непрерывный процесс адаптации рабочей модели распространения радионуклидов к конкретным условиям по результатам измерений на местности. Структура мониторинга направлена на решение следующих задач: своевременное, уже на ранней фазе развития аварии, обнаружение атмосферного выброса (или жидкого сброса) радионуклидов; экспресс-оценка активности источника или мощности дозы; отслеживание радиационной обстановки целевым образом в зоне фактического радиоактивного загрязнения. В отличие от типовых схем мониторинга, основным средством проведения измерений являются передвижные радиометрические лаборатории. Стационарные посты контроля используются для определения формы радиационного следа на местности.

Передвижные радиометрические лаборатории

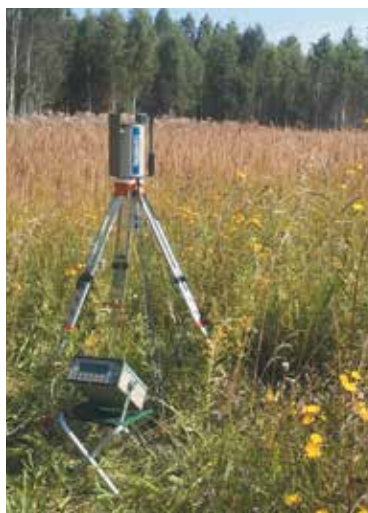
Передвижные радиометрические лаборатории (ПРЛ), действующие в составе объектовых и территориальных АСКРО, используются для уточнения данных, получаемых от стационарных постов радиационного контроля, а также для проведения радиационной разведки вне зоны действия стационарных постов контроля. Применение ПРЛ значительно повышает эффективность АСКРО и оперативность принятия решений.



ИБРАЭ РАН совместно с НПП «Доза», ООО «Автоспектр-НН» и ООО «Автолик» разработаны и введены в эксплуатацию 35 передвижных радиометрических лабораторий на базе шасси микроавтобусов или автомобилей повышенной проходимости. Они предназначены для автономной работы в полевых условиях и выполнения следующих основных задач:

- обнаружение и локализация радиоактивных источников и загрязнений;
- картографирование границ загрязненных территорий;
- определение характеристик радиоактивных загрязнений;
- отбор проб почвы, воды и воздуха;
- передача данных измерений в кризисные центры в режиме реального времени.

В комплект ПРЛ входят измерительное и дозиметрическое оборудование, компьютерная система (промышленный защищенный компьютер со встроенным прикладным ПО), средства видеофиксации, навигации, спутниковой и мобильной связи, устройства отбора и экспресс-анализа проб воздуха, воды и грунта. Основным измерительным средством является спектрально-чувствительная дозиметрическая установка «Гамма-сенсор», которая

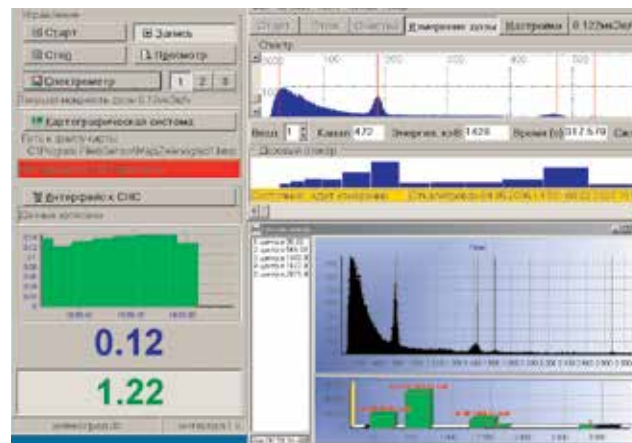


Мобильная группа Центра научно-технической поддержки ИБРАЭ РАН, проведение радиационной разведки в полевых условиях

Полевые измерения полупроводниковым гамма-спектрометром, д. Красная Гора, Брянская область

Передвижная радиометрическая лаборатория Центра научно-технической поддержки ИБРАЭ РАН





обеспечивает проведение гамма-съемки местности, определение нуклидного состава источника радиоактивного загрязнения, точную географическую привязку измерений с нанесением данных на электронную карту, ведение базы данных и передачу данных измерений в кризисный центр в режиме реального времени.

Для работы с установкой «Гамма-сенсор» в НПП «Доза» создана специализированная программа «Сенсор». Она обеспечивает управление аналого-цифровым преобразователем (АЦП) и спутниковой навигационной системой GPS, расчет мощности эквивалентной дозы в точке размещения детектора и оценку вклада излучения радионуклидов в дозу, отображение измеренных энергетического и дозового гамма-спектров с возможностью их масштабирования.

Передвижная радиометрическая лаборатория Центра научно-технической поддержки ИБРАЭ РАН и рабочий экран программы «Сенсор»

Установка «Гамма-сенсор» на базе защищенного ПК с блоками детектирования БДЭГ-4 и БДМГ-200



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АВАРИЙНОГО РЕАГИРОВАНИЯ

Сложность и наукоемкость атомных технологий предъявляют специфические требования к организации служб аварийной готовности, уровню квалификации персонала, и особенно к качеству научно-технического обеспечения радиационного мониторинга и аварийного реагирования. От выполнения этих требований напрямую зависит эффективность принятия решений по защите населения при возникновении ЧС с радиационным фактором.

Задача научно-технического обеспечения аварийного реагирования состоит в повышении эффективности и качества принятия решений при ЧС с радиационным фактором, повышении оперативной готовности органов управления и сил территориальных подсистем Российской единой системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций (РСЧС), выработке рекомендаций по минимизации радиологических и социально-экономических последствий ЧС и информированию общественности по вопросам ядерной и радиационной безопасности.

ИБРАЭ РАН является одним из признанных мировых лидеров в области исследования физических процессов распространения радионуклидов в различных средах при аварии на АЭС и иных ЯРОО, разработки и создания программных комплексов оценки и прогнозирования радиационной обстановки, моделирования сценариев радиационных аварий и выработки мер по защите населения. С 1996 г. в ИБРАЭ РАН действует Центр научно-технической поддержки, осуществляющий круглосуточную научно-техническую поддержку участников системы аварийного реагирования.



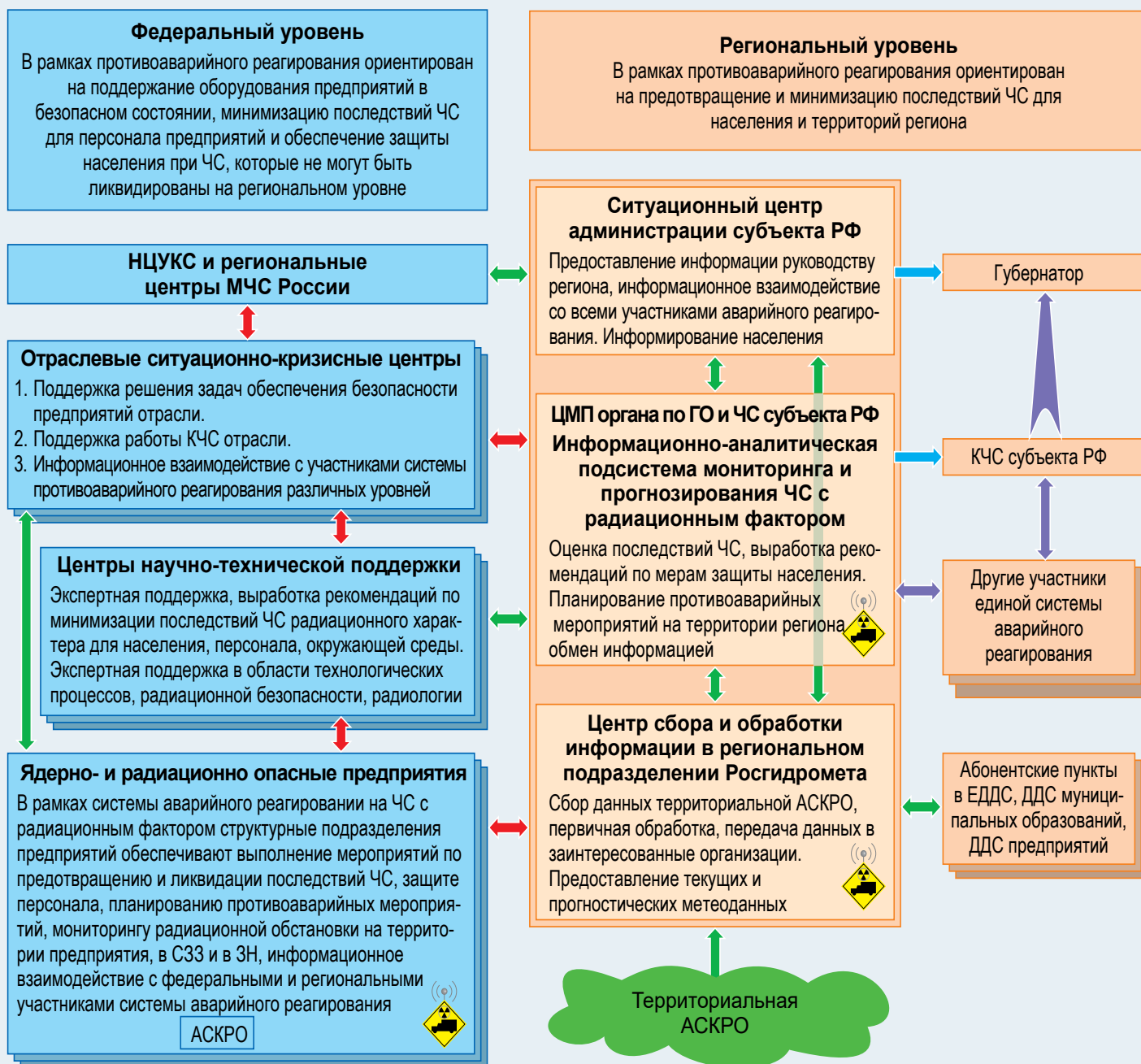
Красноперов Сергей Николаевич

заведующий отделением развития
систем аварийной готовности
и реагирования

«Специфика готовности к реагированию на радиационные аварии заключается в том, что оперативная высококвалифицированная научно-техническая поддержка органов управления РСЧС, достоверный прогноз и анализ ситуации позволяют предупредить многократное увеличение ущерба и потерь».



*Красноперов С. Н.
и Гаврилов С. Л.
обсуждают
вопросы развития
территориальных
систем
радиационного
мониторинга
и аварийного
реагирования*



Обозначения:

- Информационная и техническая поддержка
- Взаимодействие и передача оперативных данных в штатном режиме и в режиме ЧС
- Информационный обмен между участниками аварийного реагирования

- Взаимодействие в штатном режиме и в режиме ЧС. Передача оперативных данных только в режиме ЧС
- Мобильные средства радиационной разведки
- Объектовая АСКРО

Схема взаимодействия участников российской системы аварийного реагирования на ЧС с радиационным фактором

Программно-технический комплекс поддержки принятия решений

Для решения задач научно-технической поддержки мероприятий по защите населения и окружающей среды при чрезвычайных ситуациях с радиационным фактором в ИБРАЭ РАН создан комплекс информационных и программно-технических средств, который широко используется в практической работе ЦНТП ИБРАЭ РАН. Его основу составляют компьютерные расчетные коды, предназначенные для оценки радиационной обстановки в зоне аварии, прогнозирования доз облучения населения, разработки рекомендаций по мерам радиационной защиты. Справочно-информационная компонента комплекса включает в себя банк электронных карт и базы данных, содержащие описания характеристик ЯРОО и территорий их размещения, радиологические сценарии аварий, нормативно-техническую документацию.

В состав программно-технического комплекса ЦНТП ИБРАЭ РАН входят следующие основные программные ресурсы:

Программное средство прогнозирования развития чрезвычайных ситуаций радиационного характера НОСТРАДАМУС

Предназначено для оперативного прогнозирования радиационной обстановки при выбросах радиоактивных материалов как во время аварий на ЯРОО, так и при их нормальной эксплуатации. Может использоваться для оценки экологической ситуации вокруг объектов, производящих выбросы радиоактивных веществ и аэрозолей в атмосферу. Компьютерная система моделирования основана на лагранжевой модели атмосферного переноса и содержит базу данных по свойствам радионуклидов (коэффициенты дозового преобразования, периоды полураспада). В расчете учитываются нестационарность источника, как точечного, так и объемного, а также полидисперсный состав выброса. Для определения дозовых нагрузок используются известные дозиметрические модели и базы данных по коэффициентам дозового преобразования (в соответствии с НРБ-99/09).

Основные характеристики ПС НОСТРАДАМУС:

- оперативность прогноза и возможность работы в реальном времени;
- модульность структуры; для обеспечения оперативности работы предусмотрены независимые модули ввода исходных данных по источнику и метеоинформации, которые могут работать автономно; в качестве отдельных модулей в систему включены блок приспособления ветрового поля к местному рельефу, а также блоки быстрой оценки высоты подъема примесей за счет конвекции при наличии тепловыделения;
- возможность просмотра и анализа развития радиационной обстановки на всей территории расчетной области, а также в отдельных точках (населенных пунктах);
- представление результатов расчета в удобном для восприятия виде — на картографической основе с цветовым выделением зон, где ожидается превышение допустимых дозовых нагрузок.



Бакин Равиль Ибрагимович

заведующий лабораторией анализа и прогноза последствий радиационных аварий

«Эффективная научно-техническая поддержка реагирования на угрозы радиационного характера требует наряду с квалифицированными кадрами развития интеллектуального ядра — системы современных программных комплексов анализа, оценки и разработки рекомендаций по оптимальным мерам реагирования. Такие разработки позволяют существенно повысить информационно-аналитическую поддержку ситуационных центров федеральных органов исполнительной власти в случае радиационного инцидента или аварии».

Входные данные ПС НОСТРАДАМУС: данные об источнике (положение, интенсивность выброса, продолжительность, нуклидный и дисперсный состав) и метеоданные (скорость и направление ветра на разных высотах, интенсивность осадков, категория устойчивости атмосферы либо синоптические данные, необходимые для определения класса устойчивости).

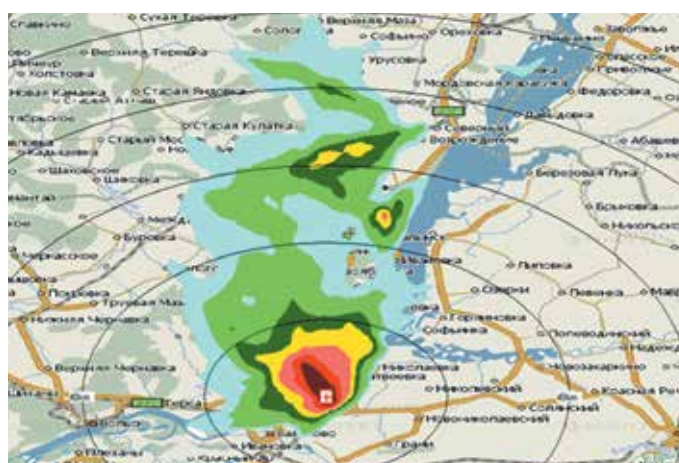
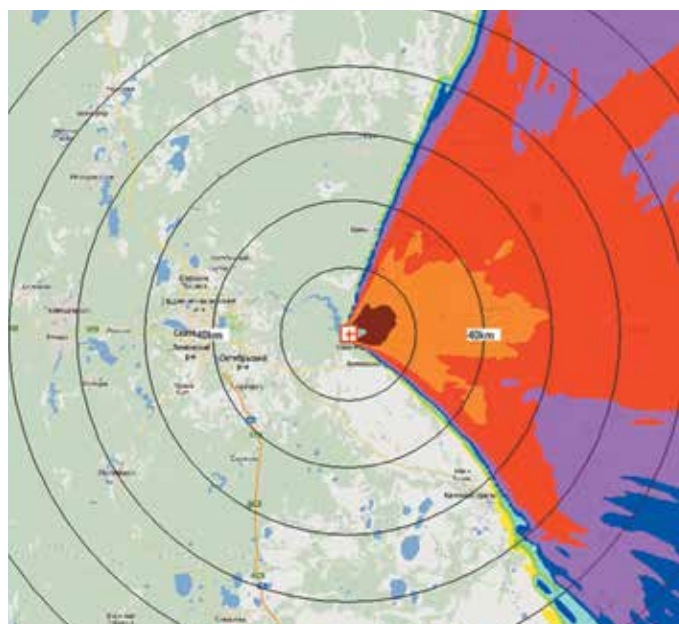
Выходные данные: приземные концентрации радионуклидов, плотности выпадений (распределение приземных и поверхностных концентраций радионуклидов, в свою очередь, определяет дозовые нагрузки на население), а также прогнозируемые дозы и мощности дозы от различных радионуклидов и по различным путям облучения.

Верификация ПС НОСТРАДАМУС проведена на экспериментальном материале, включающем в себя более 800 измерений приземных концентраций в разных экспериментах. Результаты верификации модели распространения (аттестационный паспорт № 158.1 от 17.04.2014, выдан сроком на 10 лет) показали, что она в целом дает правильную оценку приземных концентраций примеси и может быть использована для более широкого круга условий распространения радионуклидов по сравнению со стандартными методиками.

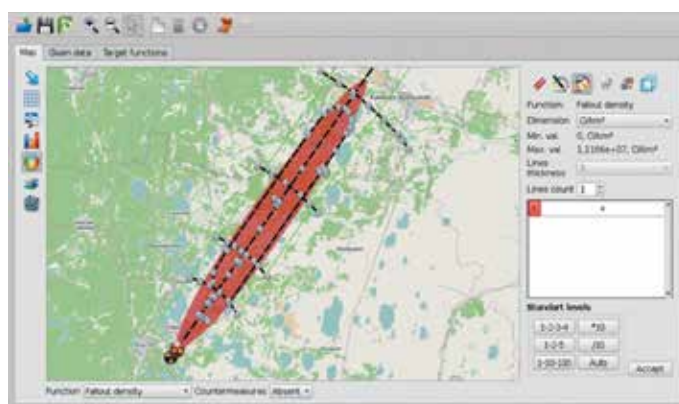
Программное средство прогнозирования радиационной обстановки при радиоактивных атмосферных выбросах в ближней зоне ЯРОО

Разработанное ИБРАЭ РАН программное средство предназначено для экспресс-оценки последствий радиационных аварий (расчет интегральной концентрации радиоактивной примеси, мощности дозы, ожидаемых ингаляционных доз и доз облучения по пищевым цепочкам) и кратковременных выбросов радиоактивных веществ в атмосферу в ближней зоне ЯРОО (на расстояниях до 30 км).

Особенностями программы являются улучшенная параметризация полуэмпирической гауссовой модели атмосферного переноса радиоактивной примеси, высокая скорость работы и учет полидисперсности примеси. Это дает возможность проводить детальное моделирование процессов диффузии радионуклидов в приземном слое в условиях сложного рельефа местности, а также при оценке радиационных аварий, сопровождающихся взрывом.



Примеры визуализации результатов расчетов атмосферных выбросов по коду НОСТРАДАМУС



Расчетное моделирование плотности поверхностного загрязнения радиоактивными веществами

Программный комплекс БРИЗ

Инженерный программный комплекс БРИЗ предназначен для оперативного расчета дозовых характеристик (экспозиционной дозы и МАЭД) полей ионизирующего фотонного излучения, создаваемых точечными, линейными, поверхностными и объемными источниками с равномерным распределением мощности. Расчет осуществляется как при наличии защиты, так и без нее, а также с учетом рассеянного излучения, при этом скорость расчета по коду БРИЗ на порядок выше скорости расчета по широко используемому коду MicroShield (США).

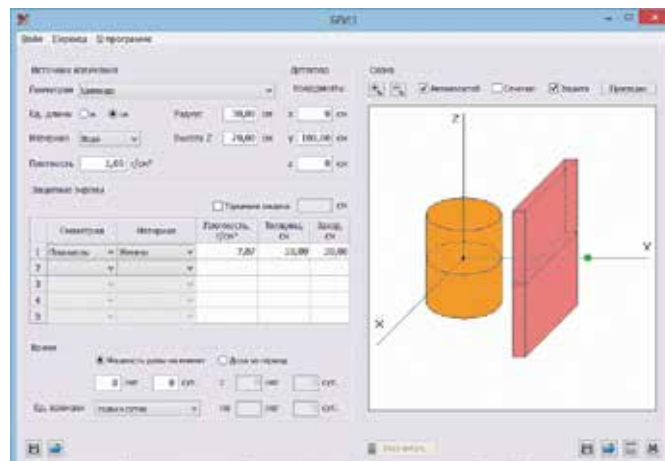
Программная система ПИОНЕР

В рамках научно-технической поддержки мероприятий по радиационному мониторингу и аварийному реагированию значимое место отведено созданию компьютерных симуляторов и систем имитации послеаварийной радиационной обстановки, необходимых для тренировок персонала кризисных центров и при проведении комплексных противоаварийных учений. Наиболее совершенным программным средством данного назначения является разработанная ИБРАЭ РАН система ПИОНЕР, обеспечивающая имитацию последствий аварии на ЯРОО с генерацией данных оперативной радиационной разведки местности в зоне радиоактивного следа.

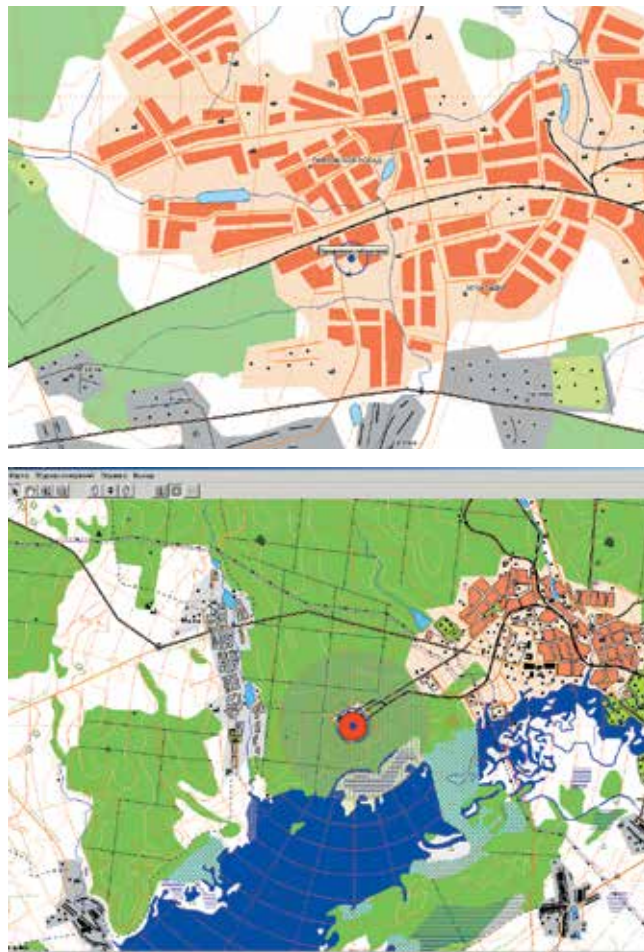
Программная система ПИОНЕР построена на базе ГИС-технологий, поддерживает загрузку и масштабирование карт местности в векторном формате, реализует эффективный алгоритм координатного преобразования и позволяет генерировать в режиме реального времени результаты измерений мощности дозы на открытой местности и гамма-спектрометрического анализа проб почвы и воздуха в течение первых суток после условной аварии.

Программное средство ДОЗА+

Предназначено для расчета активности источника радиационного загрязнения и проведения экспресс-оценки дозовых нагрузок на население в начальный период радиационной аварии. Использование рекомендованной МАГАТЭ методики IAEA-TECDOC-1162/R позволяет проводить быстрые инженерные расчеты дозовых нагрузок на человека от источников бета- и гамма-излучения простейшей геометрии (точечных,



Пример рабочего окна ПК БРИЗ при расчете задачи с объемным цилиндрическим источником ионизирующего излучения и плоской защитой



Примеры рабочих экранов системы ПИОНЕР с указанием уровней мощности дозы гамма-излучения, расположения ЯРОО, датчиков АСКРО и местонахождения мобильной группы радиационного контроля

линейных, дисковых) на различных расстояниях от источника, а также выполнять расчет доз внутреннего облучения вследствие поступления радиоактивных веществ с вдыхаемым воздухом и по пищевой цепочке.

Программный комплекс Кассандра

Актуальной проблемой радиоэкологии является моделирование миграции радиоактивных веществ в водной среде. Разработанный в ИБРАЭ РАН программный комплекс (ПК) Кассандра предназначен для расчета уровней загрязнения рек и водоемов при сбросах радиоактивных веществ, оценки доз облучения населения при водопользовании, экспресс-анализа аварийных ситуаций, происходящих на различных этапах жизненного цикла ЯРОО.

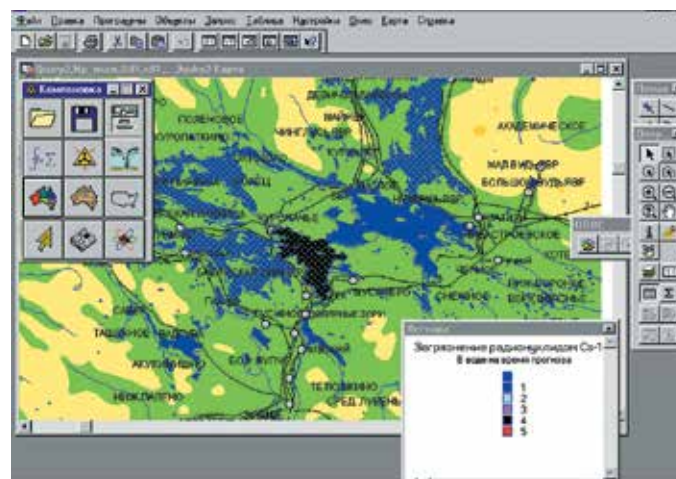
ПК Кассандра использует двухкамерные (водная масса / слой донный отложений) модели миграции радионуклидов в водных объектах (река / водоем), учитывающие основные физико-химические процессы в них и обеспечивающие проведение расчетов с различным уровнем детализации входных данных. Блочная структура комплекса позволяет включать в него сторонние модели рек и водоемов. Он интегрирован на базе ГИС-технологий с моделями атмосферного переноса радионуклидов (в частности, с кодом НОСТРАДАМУС), получая от них входные данные о выпадении радиоактивных веществ в водные объекты и их водосборы.

Программный комплекс Нептун

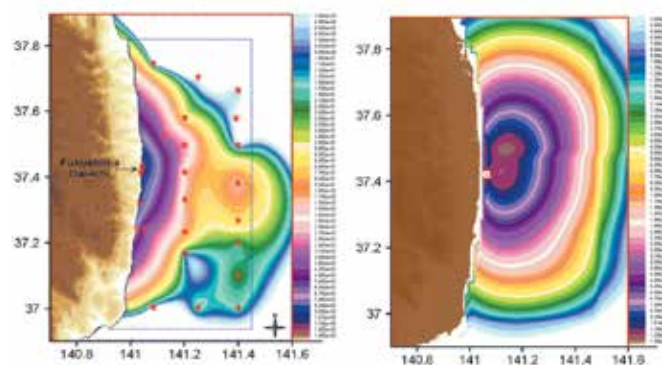
Решение многих задач радиационного мониторинга и аварийного реагирования связано с необходимостью расчета миграции радионуклидов в морской (океанической) среде. В основе разработанного в ИБРАЭ РАН совместно со специалистами Института океанологии РАН и ИВТ РАН программного комплекса Нептун лежит лагранжева стохастическая модель крупных частиц, которая учитывает характерные особенности рассеивания примеси в квазиоднородном приповерхностном слое перемешивания, изменчивость морских и океанских течений, эффекты турбулентности на малых глубинах и вблизи береговой линии. ПК Нептун используется при анализе безопасности объектов атомного флота и оценке последствий радиационных аварий в морях и океанах.



Программное средство Доза+ для расчета активности источника радиационного загрязнения



Пример рабочего окна программного комплекса Кассандра



Примеры рабочего окна программного комплекса Нептун

Трехмерное гидродинамическое моделирование атмосферного переноса радиоактивных веществ в условиях промышленной или городской застройки

Специалистами отделения развития систем аварийной готовности и реагирования и лаборатории суперкомпьютерного моделирования и программных комплексов ИБРАЭ РАН в рамках работ по реализации ФЦП ЯРБ-1 были успешно выполнены НИР по созданию прототипа программного комплекса расчета переноса газоаэрозольных примесей в условиях трехмерной геометрии. В нем реализованы математические модели переноса газоаэрозольных примесей, модели осаждения аэрозолей на горизонтальные и вертикальные поверхности, модели расчета дозы облучения человека при внешнем гамма-излучении и ингаляции радионуклидов.

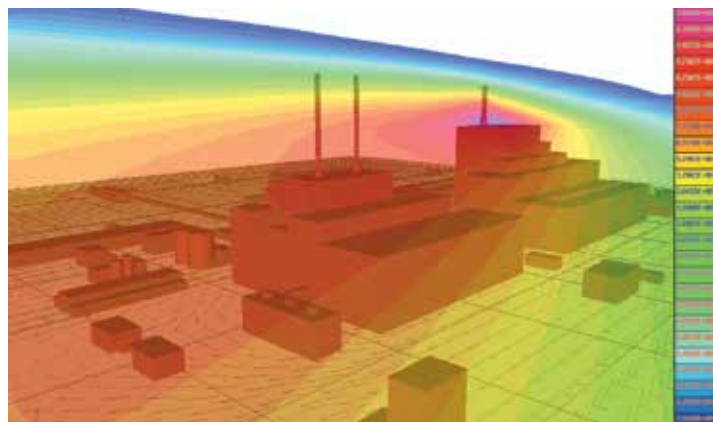
В состав комплекса входит также модуль по созданию трехмерных моделей застройки и построению на их основе пространственных сеток для дальнейшего расчета переноса, а также база трехмерных компьютерных упрощенных моделей промплощадок ЯРОО Госкорпорации «Росатом» для целей моделирования переноса радиоактивных примесей в промышленной застройке (база включает модели 29 промплощадок ЯРОО). В ходе выполнения НИР программный код прошел валидацию на натурных экспериментах. Комплекс осуществляет оперативное картирование уровней радиационного фона, радиационного загрязнения поверхностей, концентрации примеси в воздухе и ряду других параметров. В комплексе реализованы элементы системы тренинга и помощи в принятии решений в условиях радиационной аварии на ЯРОО.

Программные средства расчетной оценки радиологической безопасности АЭС с ВВЭР

В 2017 году специалистами отделения анализа безопасности ядерных энергетических установок и отделения развития систем аварийной готовности и реагирования ИБРАЭ РАН был успешно реализован проект по созданию инструментария для обоснования безопасности действующих и проектируемых АЭС с ВВЭР в проектном и запроектном режимах работы, в том числе при тяжелых авариях с разрушением активной зоны реакторов. Проект основан на совместном использовании аттестованных программных средств СОКРАТ и НОСТРАДАМУС, что обеспечивает сквозной согла-



Верификация 3D модуля атмосферного переноса примеси на натурном эксперименте в Оклахоме, США;



Результаты моделирования распространения примеси для одной из моделей промплощадки ЯРОО



Фрагмент импортированной карты OpenStreetMap



Сороковикова Ольга Спартаковна

д.ф.-м.н., зав. лабораторией
суперкомпьютерного моделирования
и программных комплексов

«Большинство моделей атмосферного переноса радионуклидов, используемых при решении практических задач радиационного мониторинга и аварийного реагирования, не описывают аэродинамических эффектов, возникающих при обтекании препятствий (зданий и сооружений) и неприменимы в условиях городской и индустриальной застройки. Между тем, с увеличением количества ЯРОО в мире и с возрастанием угрозы радиологического терроризма возникает настоятельная необходимость адекватного прогнозирования последствий ЧС с радиационным фактором в мегаполисе.

Современный уровень развития вычислительной техники позволяет реализовать наиболее эффективный метод прогнозирования, основанный на численном решении трехмерных уравнений Навье-Стокса

с использованием моделей турбулентности — CFD кодов».

сованный расчет всех стадий аварийного процесса, начиная от исходного события аварии, и адекватную оценку доз облучения населения.

В настоящее время ИБРАЭ РАН, руководствуясь требованиями и стандартами МАГАТЭ и МКРЗ по применению современных подходов к радиологическому моделированию при обосновании безопасности и зонировании территории вокруг АЭС, осуществляет разработку нового программного средства для проведения многовариантных расчетов возможных радиологических последствий и оценки дозовых нагрузок на население, обусловленных атмосферными выбросами при ЧС с радиационным фактором на АЭС с реакторами ВВЭР.

Обоснование безопасности объектов ядерного наследия при моделировании атмосферных выбросов радиоактивных веществ

В рамках ФЦП ЯРБ-2 с участием нескольких отделений ИБРАЭ РАН, под общим руководством отделения анализа долгосрочных рисков в сфере обеспечения ядерной и радиационной безопасности, проводятся НИР по созданию расчетно-прогностического комплекса RELTRAN. Он предназначен для решения задач по обеспечению радиационной безопасности объектов использования атомной энергии как в период их функционирования, так и при выводе из эксплуатации, включая оценку параметров атмосферного выброса, моделирование атмосферного переноса радиоактивных веществ, оценку параметров радиационной обстановки и определение необходимости и эффективности контрмер. В ходе реализации поставленных задач в 2016–2017 годах решены вопросы разработки технологической платформы и архитектуры базовой версии RELTRAN, сформулированы требования к форме и содержанию базы исходных данных (базы знаний) в соответствии с требованиями российских нормативных документов и МАГАТЭ, определен состав физических и математических моделей комплекса RELTRAN и сформулированы функциональные требования к ним. Определены функциональные и программные блоки комплекса, принципы их работы и информационного взаимодействия.

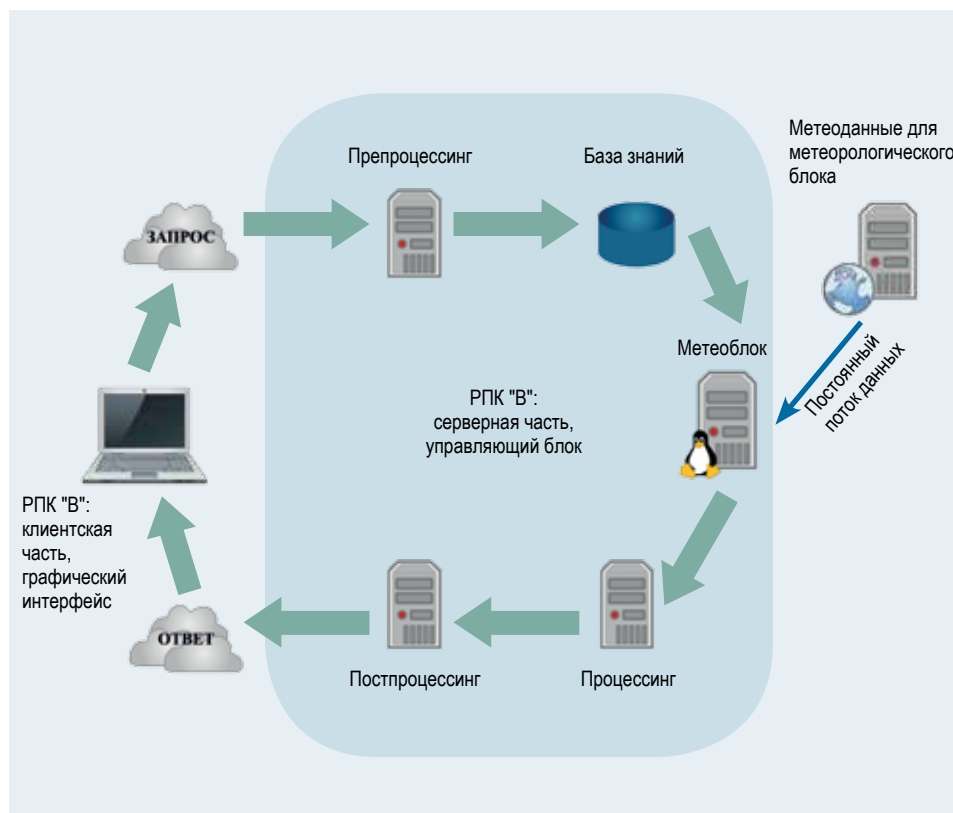
Картографическое обеспечение программно-технического комплекса

Современные программно-технические комплексы для систем радиационного мониторинга и аварийного реагирования разрабатываются на основе технологии геоинформационных систем (ГИС). Основным рабочим интерфейсом ГИС-приложения является электронная карта, через которую можно получить доступ ко всей имеющейся информации по интересующим объектам, а также наглядно отобразить результаты анализа и моделирования в рамках данного приложения.

В ИБРАЭ РАН в течение длительного времени проводятся работы по созданию и пополнению единого банка электронных карт (БЭК ИБРАЭ).

Сегодня банк электронных карт ИБРАЭ включает в себя большое количество векторных и растровых карт и планов различных масштабов:

- обзорные карты мира (масштабов 1:30 000 000, 1:1 600 000);
- обзорные карты России и стран СНГ (масштабов 1:1 000 000, 1:8 000 000);



Киселев Алексей Аркадьевич

к.т.н., н.с. лаборатории
разработки программных комплексов
поддержки принятия решений

*Общая структура расчетно-
прогностического комплекса RELTRAN*

- карты регионов России (масштабов 1:1 000 000, 1:100 000, OpenStreetMap);
- карты окрестностей ЯРОО России (масштабов 1:100 000, 1:200 000);
- отдельные номенклатурные листы карт различных масштабов (1:1 000 000, 1:200 000);
- отдельные тематические слои, растровые карты, планы и спутниковые снимки.

Мобильный программно-технический комплекс

Одним из инновационных решений ИБРАЭ РАН в области аварийного реагирования стало создание мобильного программно-технического комплекса поддержки эксперта по радиационной безопасности. Комплекс реализован на базе защищенного портативного компьютера, к которому подключены блок детектирования (БДМГ-200) для измерения мощности амбиентной дозы гамма-излучения и модуль географической привязки (на базе GPS-приемника).

Прикладное ПО мобильного комплекса позволяет проводить экспресс-анализ радиационной обстановки и передавать его результаты в центр научно-технической поддержки ИБРАЭ РАН, что обеспечивает оперативность и высокое качество принятия решений в случае возникновения чрезвычайной ситуации с радиационным фактором.





Справочная система нормативно-технической документации по аварийному реагированию

Предназначена для информационного обеспечения территориальных систем аварийного реагирования и радиационного мониторинга и позволяет хранить, выполнять поиск и отображать тексты и реквизиты нормативных документов, а также стандартов, применяемых на территории России и регламентирующих деятельность единой государственной системы предупреждения и ликвидации ЧС на различных уровнях организации. Система отличается информационной полнотой и содержит большое количество документов по теме, в том числе законодательные акты федерального уровня, документы министерств, ведомств, АО, предприятий и организаций, нормативные документы, стандарты и методические руководства, описания территориальных систем аварийного реагирования, международные документы и публикации МАГАТЭ.

Технический комплекс ЦНТП ИБРАЭ РАН

Включает в себя аппаратные средства, необходимые для успешного решения задач научно-технической поддержки участников системы аварийного реагирования:

- современные автоматизированные рабочие места персонала;
- систему видеоконференцсвязи и спутниковой связи;
- оборудование для аудио- и видеопрезентаций;
- серверное и коммуникационное оборудование;
- кластерную вычислительную установку ИБРАЭ РАН для ресурсоемких вычислений;
- систему бесперебойного электропитания на основе дизель-генераторной установки;
- комплекты дозиметрического оборудования.

Сотрудники отделения развития систем аварийной готовности и реагирования и отделения научно-технических проблем развития комплексных систем мониторинга ИБРАЭ РАН

Более **40** различных программно-технических комплексов, предназначенных для экспертного и информационно-аналитического обеспечения готовности к действиям в условиях радиационных аварий разработано в общей сложности в ИБРАЭ РАН на сегодняшний день

ЦЕНТР НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ПОДДЕРЖКИ ИБРАЭ РАН



Арутюнян Рафаэль Варназович

д.ф.-м.н., руководитель ЦНТП ИБРАЭ РАН

«В структуре ИБРАЭ РАН его Центр технической поддержки является подразделением, обеспечивающим практическую реализацию результатов фундаментальных и прикладных научных исследований Института в области ядерной, радиационной и экологической безопасности. Прежде всего, речь идет о расчетных моделях и программных кодах, которые предназначены как для моделирования физических процессов, связанных с протеканием проектных и запроектных (в том числе тяжелых) аварий в атомных реакторах различных типов, так и для моделирования процессов распространения радиоактивных веществ в окружающей среде и оценки дозовых нагрузок на население. Этот программный инструментарий составляет основу программно-технического комплекса ЦНТП ИБРАЭ РАН, обеспечивающего решение задач научно-технической поддержки аварийного реагирования и мероприятий по защите населения и окружающей среды при чрезвычайных ситуациях с радиационным фактором.»

Во всем мире в настоящее время задачи аварийного реагирования на чрезвычайные ситуации с радиационным фактором решаются путем создания специализированных кризисных центров. В России эта концепция была принята около 20 лет назад, а первые действующие структуры были сформированы еще в 1987 году, вскоре после чернобыльской аварии.

В 1992 г. в составе Отделения радиационной безопасности и радиационного риска ИБРАЭ РАН была создана лаборатория, в задачи которой входило проведение исследований в области научно-технического обеспечения аварийного реагирования. В 1996 г. на ее базе был организован Центр технической поддержки Кризисного центра концерна «Росэнергоатом», преобразованный в 1999 году в Технический кризисный центр (ТКЦ) ИБРАЭ РАН, а в 2013 году — в Центр научно-технической поддержки (ЦНТП) ИБРАЭ РАН. На сегодняшний день ЦНТП является одним из ключевых участников системы аварийного реагирования России. В рамках соответствующих соглашений, он осуществляет комплексную научно-техническую, экспертную и информационную поддержку федеральных и региональных органов власти, отраслевых и ведомственных кризисных центров (НЦУКС МЧС России, СКЦ Росатома, КЦ концерна «Росэнергоатом», ГУ МЧС России по г. Москве) при решении задач прогнозирования радиационной обстановки, оценки рисков для населения и окружающей среды, минимизации социального и экономического ущерба в случае ЧС с радиационным фактором.

Структура ЦНТП ИБРАЭ РАН оптимизирована с учетом мирового опыта организации кризисных центров. Эксперты ЦНТП — это высококвалифицированные ученые и специалисты в области ядерной физики, физики реакторов, радиационной безопасности, радиоэкологии и разработки информационных систем, многие из которых имеют практический опыт проведения работ по ликвидации последствий радиационных аварий.

В состав ЦНТП ИБРАЭ РАН входят руководитель Центра, заместитель руководителя Центра и восемь специализированных групп сотрудников:

- экспертная группа анализа аварий и оценки параметров потенциального источника выхода радионуклидов (РН) в окружающую среду (ОС);
- экспертная группа прогноза распространения РН в ОС и пищевых цепочках;
- экспертная группа мониторинга, обработки и анализа данных по радиационной обстановке;



- экспертная группа оценки радиационных и радиозологических последствий и анализа мер по защите населения и территорий;
- административная группа обеспечения круглосуточной готовности центра;
- группа аварийного информирования;
- группа технического обеспечения;
- мобильная группа.

Взаимодействие ЦНТП ИБРАЭ РАН с отраслевыми и ведомственными кризисными и аналитическими центрами

Первоочередной задачей ЦНТП ИБРАЭ РАН является оценка последствий и выработка рекомендаций по мерам защиты населения и окружающей среды в случае возникновения чрезвычайных ситуаций на ядерно и радиационно опасных объектах. Реализация этой задачи осуществляется в одном из трех режимов: повседневной деятельности (с организацией круглосуточного дежурства экспертов и специалистов группы ОПАС — оказания помощи атомным станциям), повышенной готовности или чрезвычайной ситуации.

ЦНТП ИБРАЭ РАН включен в состав сил и средств постоянной готовности федерального уровня единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций, утвержденный постановлением Правительства Российской Федерации от 8 ноября 2013 г. № 1007.

41 — общая численность сотрудников ЦНТП ИБРАЭ РАН

в том числе:

7 — докторов наук

6 — кандидатов наук

12 — экспертов ЦНТП, обеспечивающих режим круглосуточного дежурства

16 человек аттестованы на статус спасателя



Опыт практической работы ЦНТП ИБРАЭ РАН

Специалисты ЦНТП ИБРАЭ РАН

Эксперты и специалисты ЦНТП ИБРАЭ РАН обладают большим опытом участия в работах по ликвидации последствий аварий и инцидентов с радиационным фактором. Еще до создания ИБРАЭ многие из них вошли в состав «чернобыльской» экспертной группы под руководством Л.А. Большова. Затем последовали работы по оценке и прогнозированию радиационной обстановки на промплощадке и в зоне наблюдения Армянской АЭС после разрушительного Спитакского землетрясения 1988 г.

Большов Л. А., Арутюнян Р. В. — участники Первой Международной рабочей группы по тяжёлым авариям в объекте «Укрытие». 1989 г.

В октябре 1999 г. по запросу посольства Японии в РФ в Техническом кризисном центре ИБРАЭ РАН был проведен оперативный анализ возможного развития запроектной аварии на заводе по производству ядерного топлива в г. Токаймура, а по запросу Минатома России — анализ последствий радиационного инцидента на южнокорейской АЭС «Волсунг-3», и выработаны рекомендации по минимизации последствий этих аварий.

В дальнейшем специалисты Центра обеспечивали научно-техническую и экспертную поддержку мероприятий по анализу всех инцидентов с радиационным фактором в России.



Созданы полномасштабные базы данных и базы знаний по прошлым радиационным авариям. Накоплен уникальный практический опыт обеспечения органов управления научно-технической поддержкой при ЧС с радиационным фактором.

ОПЫТ ЭКСПЕРТОВ ЦНТП ИБРАЭ РАН

Аварии	Период работы	Вид работ*
Чернобыльская АЭС (1986)	1986 — н. вр.	
Армянская АЭС (1988)	1988—1989	
Южный Урал (1949—1951, 1957)	1957—2003	
СХК (1993)	1993—1995	
Бухта Чажма (1985)	1995—2002	
Ядерные испытания	1970—1990	
Ядерная авария в г. Токаймура (Япония, сентябрь 1999 г.)	1999	
АЭС «Фукусима-1»	2011—2013	
ОАО «ЭЗТМ» (Московская область)	2013	

* — постанализ — реагирование в режиме реального времени

Эксперты ЦНТП — ведущие специалисты в области физики реакторов, радиационной безопасности, радиационного мониторинга, радиационной защиты, радиоэкологии. Более половины из них имеют практический опыт в ликвидации последствий радиационных аварий. Для оперативного радиационного обследования местности в состав ЦНТП ИБРАЭ РАН также входят 16 высококвалифицированных аттестованных спасателей с опытом радиационной разведки на загрязненных территориях, оснащенные высокотехнологичными измерительными комплексами.



Большов Л. А. в Чернобыле, 1986 г.

Очень срочно!

EMBASSY OF JAPAN
ECONOMIC SECTION
Kalashny pereulok 12, Moscow
Tel: 7-095-291-85
Fax: 7-095-291-39

ПОСОЛСТВО
ЭКОНОМИ
ОТДЕЛ
Tel: 7-095-291-85
Fax: 7-095-291-39

FACSIMILE TRANSMISSION
ФАКСИМИ
ФОТОТЕЛ

DATE: 1 Oct. 1999
TO: 2-18 Сеняковы

Первому заместителю директора
Института
проблем безопасного развития
атомной энергетики
Г-ну Р.В. АРУТЮНЯНУ

Уважаемый господин Арутюнян!

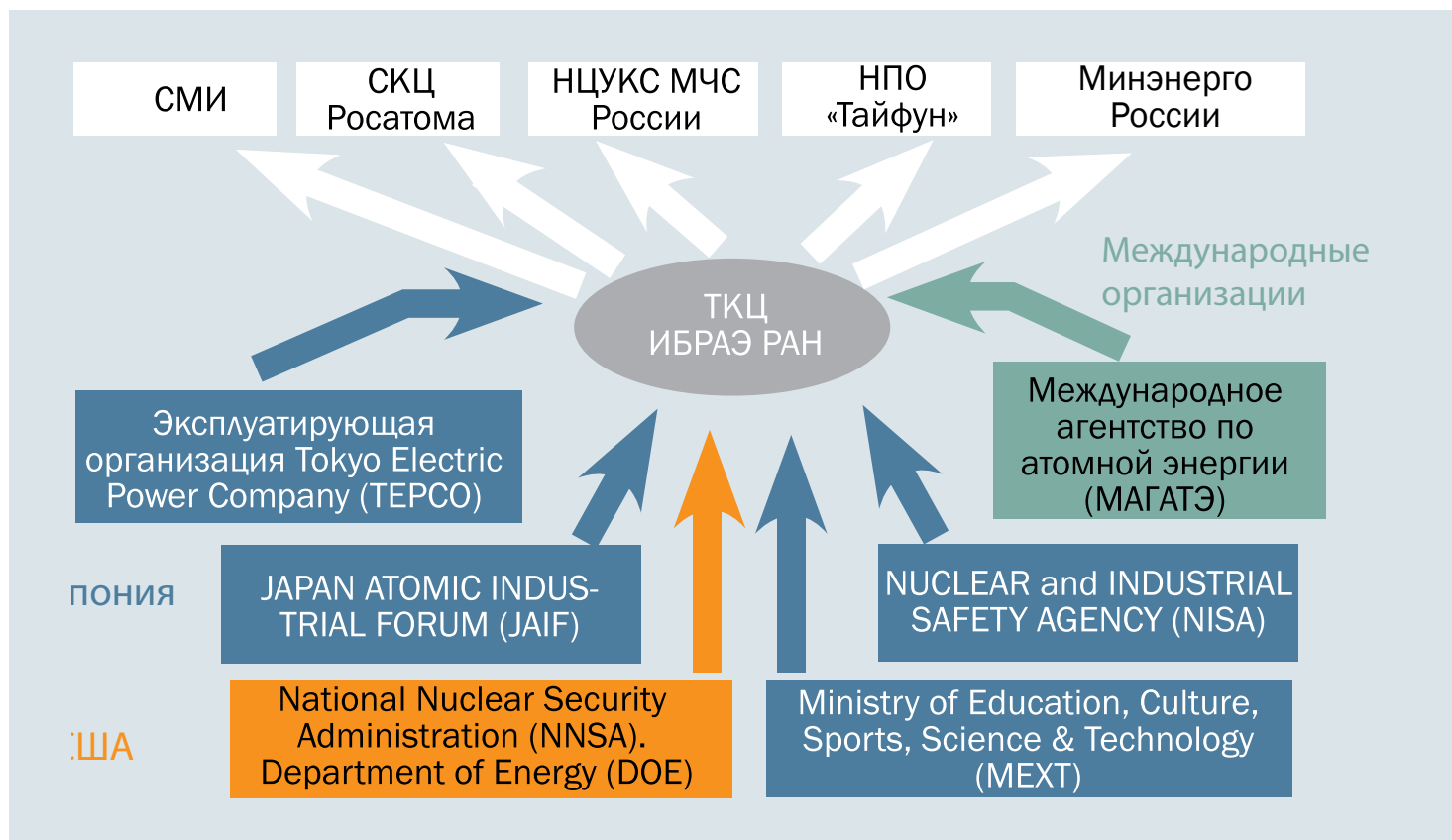
Разрешите выразить Вам глубочайшую признательность за Ваше оперативное и благожелательное содействие в отношении ядерного инцидента в г. Токаймура.

30 сентября на консервационном объекте завода компании Дай-Си-Оу в Токаймура в результате достижения критической массы имел место инцидент. Есть основания полагать, что инцидент произошел в результате действий трех сотрудников, которые в процессе изготовления топлива для экспериментального реактора на быстрых нейтронах "Дай-Си" в нарушение правил производили загрузку в отстойник раствора, содержащего 16

Мы планируем в дальнейшем последовательно информировать Россию о ходе проводимых мероприятий. Я хотел бы выразить глубокую признательность специалистам ИБРАЭ за то сотрудничество, которое они оказали в связи с указанным инцидентом.

С уважением,
行松本 敏
1-й Секретарь
Посольства Японии
в Российской Федерации
Ясухиро KOKEMATSU

По запросу посольства Японии ТКЦ ИБРАЭ РАН обеспечил научно-техническую поддержку во время аварии на заводе по переработке ядерного топлива в г. Токаймура



Авария на АЭС «Фукусима-1»

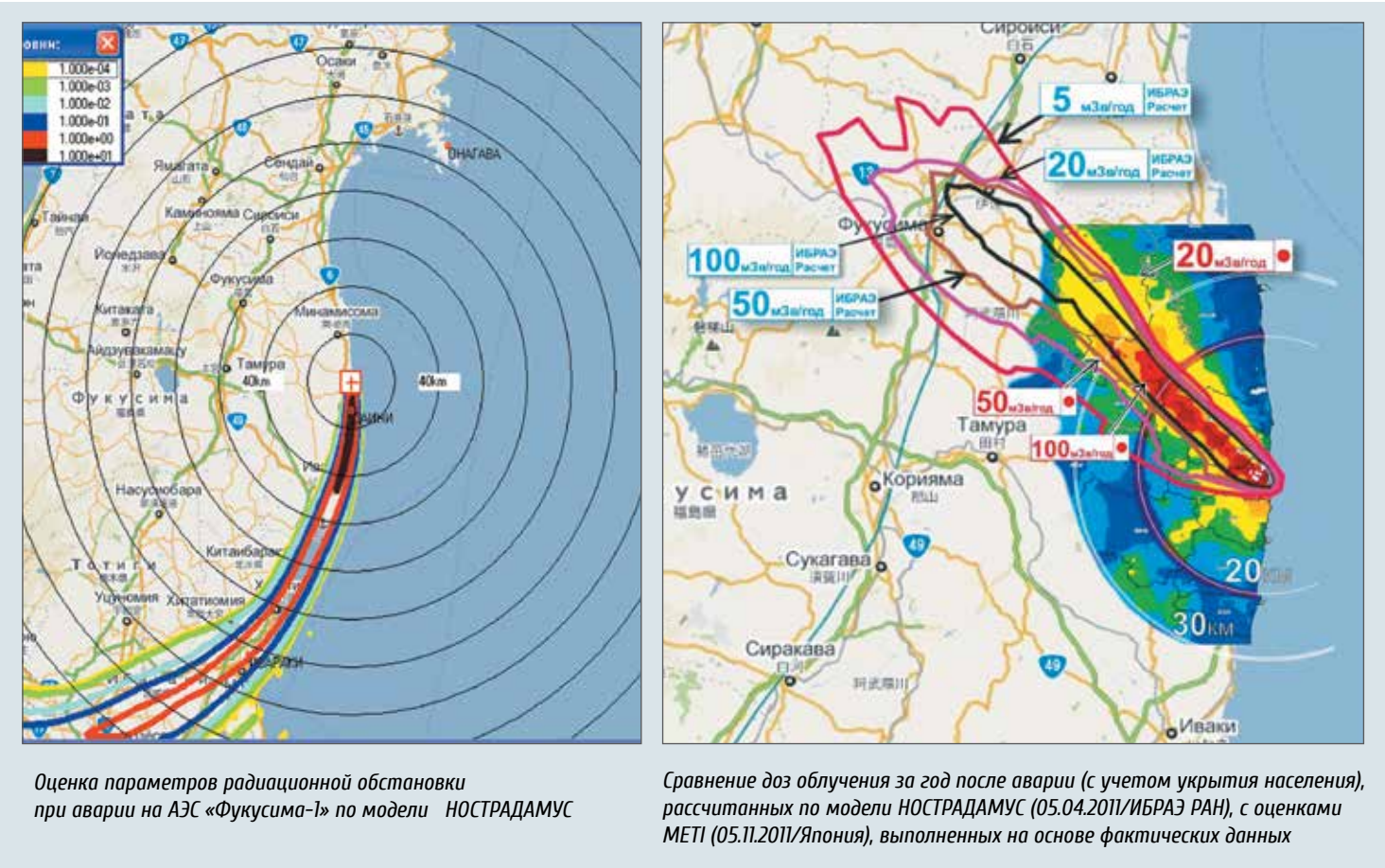
11 марта 2011 года, сразу после появления первых информационных сообщений о катастрофическом землетрясении и цунами у восточных берегов Японии, а также о вызванных этим проблемах с охлаждением реакторных установок АЭС «Фукусима-1», ТКЦ ИБРАЭ РАН был переведен в режим повышенной готовности в полном штатном составе. Работа ТКЦ в рамках осуществления задач российской единой системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций по защите населения дальневосточного региона России осуществлялась во взаимодействии с СКЦ Росатома и другими структурами через оперативный штаб Госкорпорации «Росатом» совместно со специалистами НЦУКС МЧС России и Росгидромета (НПО «Тайфун»).

Возможность негативного развития аварии с плавлением активной зоны реакторных блоков АЭС «Фукусима-1» и выходом радионуклидов за пределы их защитных оболочек рассчитывалась специалистами ИБРАЭ РАН с помощью разработанного интегрального кода СОКРАТ. По результатам вычислений был составлен прогноз последовательности и времени возникновения ключевых событий (осушение, разогрев и разрушение активной зоны реактора, взрыв водорода), который впоследствии подтвердился с большой точностью.

Прогнозирование различных сценариев развития радиационной обстановки в прилегающих к зоне аварии регионах российского Дальнего Востока осуществлялось

Схема организации круглосуточного сбора и предоставления информации экспертами ТКЦ ИБРАЭ РАН по аварии на АЭС «Фукусима-1»

В период острой фазы аварии с 11 по 17 марта 2011 г. специалистами ТКЦ ИБРАЭ РАН по поручению Правительства РФ было подготовлено **46** информационно-аналитических материалов и экспертных заключений для МЧС, Росатома и федеральных органов исполнительной власти



с использованием разработанного в ИБРАЭ РАН кода НОСТРАДАМУС с учетом фактических и реальных методанных. Первый прогноз радиационной обстановки в районе г. Владивостока, в предположении о неблагоприятном сценарии развития событий на АЭС «Фукусима-1» и о продвижении радиоактивного облака в сторону Приморского края, был подготовлен уже вечером 11 марта и направлен экспертами ТКЦ ИБРАЭ РАН в НЦУКС МЧС России 12 марта 2011 г. Последующие расчеты показали: в самом худшем случае возможная доза облучения населения Приморского края не превысит 10 мЗв за год, что не представляет опасности для здоровья людей.

Фактическое и рассчитанное в ТКЦ ИБРАЭ РАН время взрывов водорода на АЭС «Фукусима-1» в марте 2011 г.

	Расчетное время (яп.) взрыва водорода	Фактическое время (яп.) взрыва водорода
Блок 1	12 марта 15:16	12 марта 15:36
Блок 2	15 марта 05:45	15 марта 06:14

Генеральный директор ГК «Росатом» Кириенко С. В. и директор ИБРАЭ РАН Большов Л. А. докладывают Премьер-министру Путину В. В. о ситуации на АЭС «Фукусима-1», 2011 г.





Таким образом, уже в начальный, острый период протекания аварии на АЭС «Фукусима-1», специалистам ТКЦ ИБРАЭ РАН удалось оперативно объективно оценить риск радиационного загрязнения территории российского Дальнего Востока, довести до федеральных органов власти, СМИ и общественности достоверную, актуальную и научно обоснованную информацию о возможных последствиях аварии для населения России и окружающей среды.

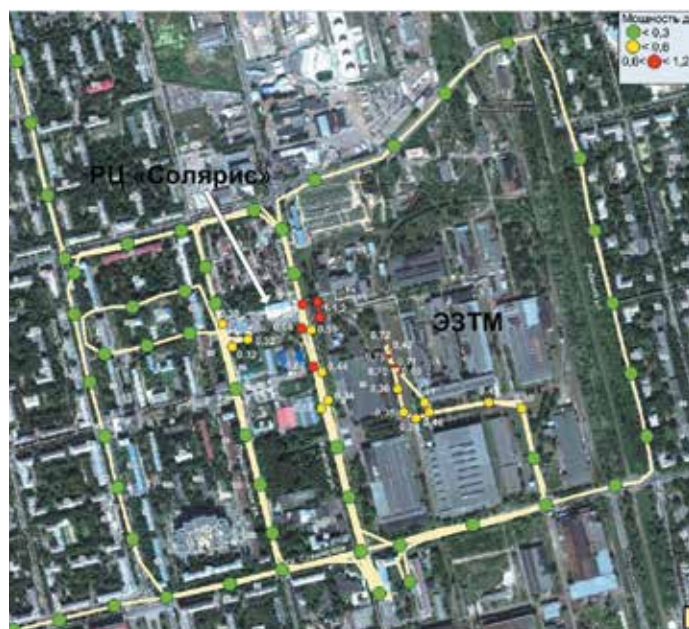
Большов Л. А. в составе делегации 46-й Ежегодной конференции японского атомного промышленного форума (JAIF) в здании 3-го блока станции «Фукусима Дайни», 23–26 апреля 2013 г.

Уроки аварии на АЭС «Фукусима-1» и новые требования к программным комплексам для обеспечения оперативной научно-технической поддержки принятия решений:

- Необходимо существенно повысить быстродействие вычислительных алгоритмов и обеспечить возможность параллельного моделирования аварийных процессов на нескольких блоках АЭС, включая БВ ОЯТ и пристанционные хранилища ОЯТ;
- Требуется наличие заранее подготовленных «входных наборов» технических параметров АЭС и хранилищ ОЯТ различных типов, характеристик окружающей среды, демографии, возможных сценариев аварий для проведения расчетных оценок и прогнозов на любом радиационно опасном объекте I категории опасности;
- Требуется разработка новых оперативных моделей прогноза распространения РВ при выбросах в морскую и океаническую среду, сопряженных с базами данных по гидрологии (карты течений и рельефа дна, береговых линий), орографии и метеорологии высокого разрешения;
- Для повышения достоверности прогноза радиационной обстановки необходима разработка построенных на технологиях нейронных сетей адаптивных методик коррекции прогнозных значений активности радиоактивных выбросов на основе данных радиационного мониторинга.

Заседание правительственной комиссии по аварии на АЭС «Фукусима-1», 2011 г.





Радиационный инцидент в городе Электросталь

В апреле 2013 г. ЦНТП ИБРАЭ РАН принимал активное участие в ликвидации последствий радиационного инцидента в г. Электросталь (Московская область), причиной которого стало попадание источника ионизирующего излучения на основе изотопа ^{137}Cs в состав металлического лома и его переплавка в индукционной печи литейного цеха Электростальского завода тяжелого машиностроения. В отличие от обычной практики экспертной поддержки субъектов аварийного реагирования, в данном случае непосредственно на место событий была направлена мобильная группа экспертов ЦНТП на передвижной радиометрической лаборатории. В задачу группы входило проведение на территории города дозиметрических измерений, оперативный анализ их результатов и составление объективного прогноза развития радиационной обстановки.

По результатам измерений был сделан обоснованный вывод, что сложившаяся радиационная обстановка не представляет опасности для здоровья людей. Это позволило успокоить население, предотвратить распространение панических слухов и избежать серьезного кризиса. В то же время, была выявлена необходимость реализации мер по обеспечению радиационной безопасности персонала завода и ограничению доступа в аварийный цех и ряд соседних цехов с последующей реабилитацией этих объектов. Соответствующие рекомендации были переданы в администрацию города, Главное управление МЧС России по Московской области и Роспотребнадзор.

Результаты проведенных специалистами ЦНТП ИБРАЭ РАН работ продемонстрировали высокую эффективность программно-технического комплекса, обеспечивающего получение дозиметрических данных в режиме реального времени и оперативный прогноз радиационной обстановки.

Маршрут ПРЛ в г. Электросталь и результаты проведенных 14.04.13 измерений МАЭД гамма-излучения

Группа радиационной разведки ЦНТП ИБРАЭ

Измерения на крыше аварийного цеха в Электростали





Учения и тренировки

В режиме повседневной деятельности задачи повышения квалификации персонала ЦНТП ИБРАЭ РАН, совершенствования программно-технической базы и поддержания высокого уровня аварийной готовности ЦНТП решаются, прежде всего, путем проведения учений и тренингов. ЦНТП ИБРАЭ РАН является активным участником комплексных противоаварийных учений, регулярно проводимых на объектах концерна «Росэнергоатом», а также организуемых Госкорпорацией «Росатом» и МЧС России с привлечением региональных кризисных центров.

Эксперты ЦНТП ежегодно участвуют в подготовке и проведении 5–6 тренингов объектового, ведомственного и регионального уровней, разрабатывают технологические и радиационные сценарии аварийных ситуаций на ЯРОО, специализированные имитационные программные средства, проводят подготовку персонала к учениям. Непосредственно в ходе учений ЦНТП ИБРАЭ РАН обеспечивает оценку источника радиоактивного выброса, прогнозирование радиологических последствий условной аварии и выработку рекомендаций по мерам защиты населения и окружающей среды.

Проведение совместных противоаварийных учений и тренировок является сферой широкого международного сотрудничества. В числе значимых примеров такого сотрудничества следует упомянуть: участие ИБРАЭ РАН в партнерстве с IRSN (Франция) в проведении национальных учений по условным авариям на исследовательских реакторах «Беккерель-1996» и «Сакле-2000»; международные учения «Арагац-99» на Армянской АЭС; совместные с Министерством энергетики США учения на Билибинской АЭС (2002 г.), на реакторе БОР-60 в ФГУП «ГНЦ РФ НИИАР» (2003 г.), тренировки по ликвидации последствий условной аварии при перегрузке ОЯТ атомного ледокола на ФГУП «РТП Атомфлот» (2005 г.) и на ФГУП «Звездочка» (2008 г.)

Организованные с участием ИБРАЭ РАН комплексные противоаварийные учения «Арктика-2011» в ЦС «Звездочка», г. Северодвинск

43 — количество международных и внутрироссийских противоаварийных учений, проведенных с участием специалистов ИБРАЭ РАН



Специалисты ЦНТП активно участвуют в подготовке и проведении учений с территориальными подсистемами Российской государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций (РСЧС). Начиная с 2007 года, такие комплексные противоаварийные и командно-штабные учения проводятся ежегодно в различных регионах нашей страны. Наиболее масштабными стали учения «Нововоронеж-2011», «Арктика-2011, 2012, 2014», «Курск-2012».

Учения «Арктика-2014» на ФГУП «Атомфлот» с приглашением международных наблюдателей от стран Арктического Совета, организованные ИБРАЭ РАН и проведенные с ГК «Росатом», г. Мурманск

В 2015–2017 гг. специалистами ИБРАЭ РАН совместно с Госкорпорацией «Росатом» и АО «Концерн Росэнергоатом» были организованы и проведены командно-штабные учения по проверке готовности к ядерной аварийной ситуации INEX-5 (International Nuclear Emergency Exercises), инициированных Агентством по атомной энергии Организации экономического сотрудничества и развития (OECD's Nuclear Energy Agency).

Созданные в ИБРАЭ РАН системы радиационного мониторинга и аварийного реагирования соответствуют задачам инновационного развития атомной отрасли и современным стандартам ядерной и радиационной безопасности. Их разработка осуществляется на основе системного подхода, учитывающего приоритетные направления



развития отрасли, современные достижения науки и техники, географию размещения ядерно и радиационно опасных объектов на территории России, оптимизацию использования ресурсов и социально-экономические факторы.

Научные основы реагирования на акты радиологического терроризма

В последние годы озабоченность общества вызывает угроза радиологического терроризма — преднамеренного диспергирования радиоактивных веществ в окружающей среде (мегаполисах, критически важных объектах инфраструктуры, включая крупные транспортные узлы) с целью нанесения прямого или косвенного ущерба здоровью людей, природной среде, социальным и экономическим институтам. Пути противодействия этой угрозе следует искать в рамках комплексного подхода, который предполагает не только выработку действенных мер профилактики и предотвращения актов радиологического терроризма, но и создание эффективной системы реагирования на такие акты, обеспечения защиты населения и минимизации возможных негативных последствий социально-экономического и общественно-политического характера.

В ИБРАЭ РАН проведен качественный и количественный анализ угроз, потенциальных ущербов, эффективности мер по предупреждению и минимизации последствий радиологического терроризма. По его результатам сделан вывод, что наиболее значимой и эффективной мерой по обеспечению устойчивости общества к угрозам радиологического терроризма является разработка адекватной реальным радиологическим рискам нормативно-правовой базы в области защиты населения и окружающей среды. Показана настоятельная необходимость создания действенной системы аварийного реагирования в условиях мегаполиса, в том числе разработки эффективных критериев, методов и технических средств оценки радиационной обстановки и поддержки принятия решений по защите населения, особенно на начальной фазе развития ЧС.

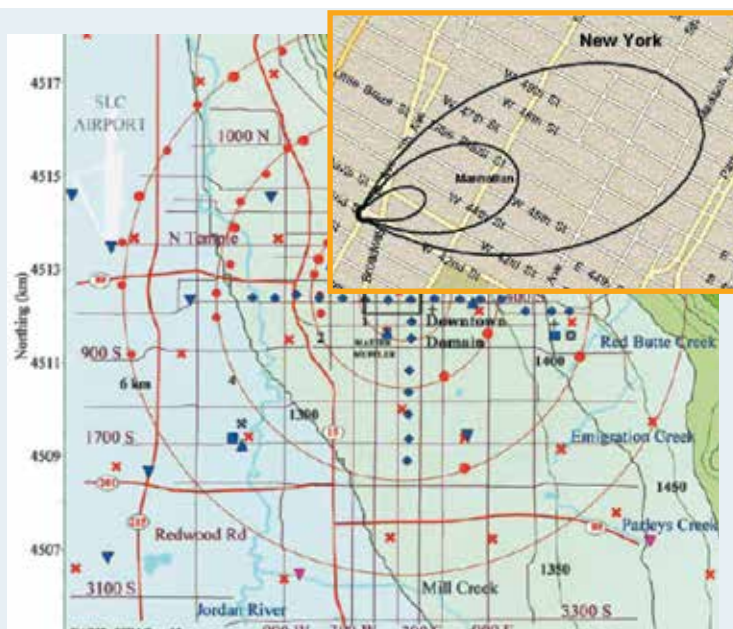
Развивая данное научное направление, ИБРАЭ РАН проводит работы по совершенствованию нормативно-правовой базы аварийного реагирования и созданию новых программных средств оценки и прогнозирования радиационной обстановки в условиях крупных городов, в частности, на основе CFD кодов.

РАДИАЦИОННАЯ АВАРИЯ В г. ГОЯНИИ (БРАЗИЛИЯ) 13 сентября 1987 года



В результате неумышленного диспергирования радиоактивности из цезиевого источника установки радиотерапии (10 г радиоактивного хлорида цезия) переоблучились 20 человек, из которых 4 умерли. Радиоактивное загрязнение охватило практически все районы города. Отсутствие готовности к оперативному реагированию на радиационный инцидент и недостаточность квалификации сотрудников противоаварийных служб привели к серьезным социально-экономическим последствиям как для города, так и для всего штата Гояс, административным центром которого является г. Гояния. Спад ВВП штата спустя несколько месяцев после инцидента составил более 20%.

Инцидент в Гоянии хорошо моделирует высокую степень опасности для населения крупного города и масштабность социально-экономических последствий гипотетических актов радиологического терроризма, связанных с диспергированием небольшого количества радиоактивных веществ.



Гипотетические последствия подрыва «грязной бомбы» в Нью-Йорке ($Am-241$)



Подрыв источника радиоактивности 10 кКи ^{137}Cs в Нью-Йорке. При теракте с использованием ^{137}Cs непосредственные жертвы практически отсутствуют, однако стоимость реабилитации территорий и зданий остается существенной, при использовании наиболее консервативного стандарта (1/2 годового ВВП США)



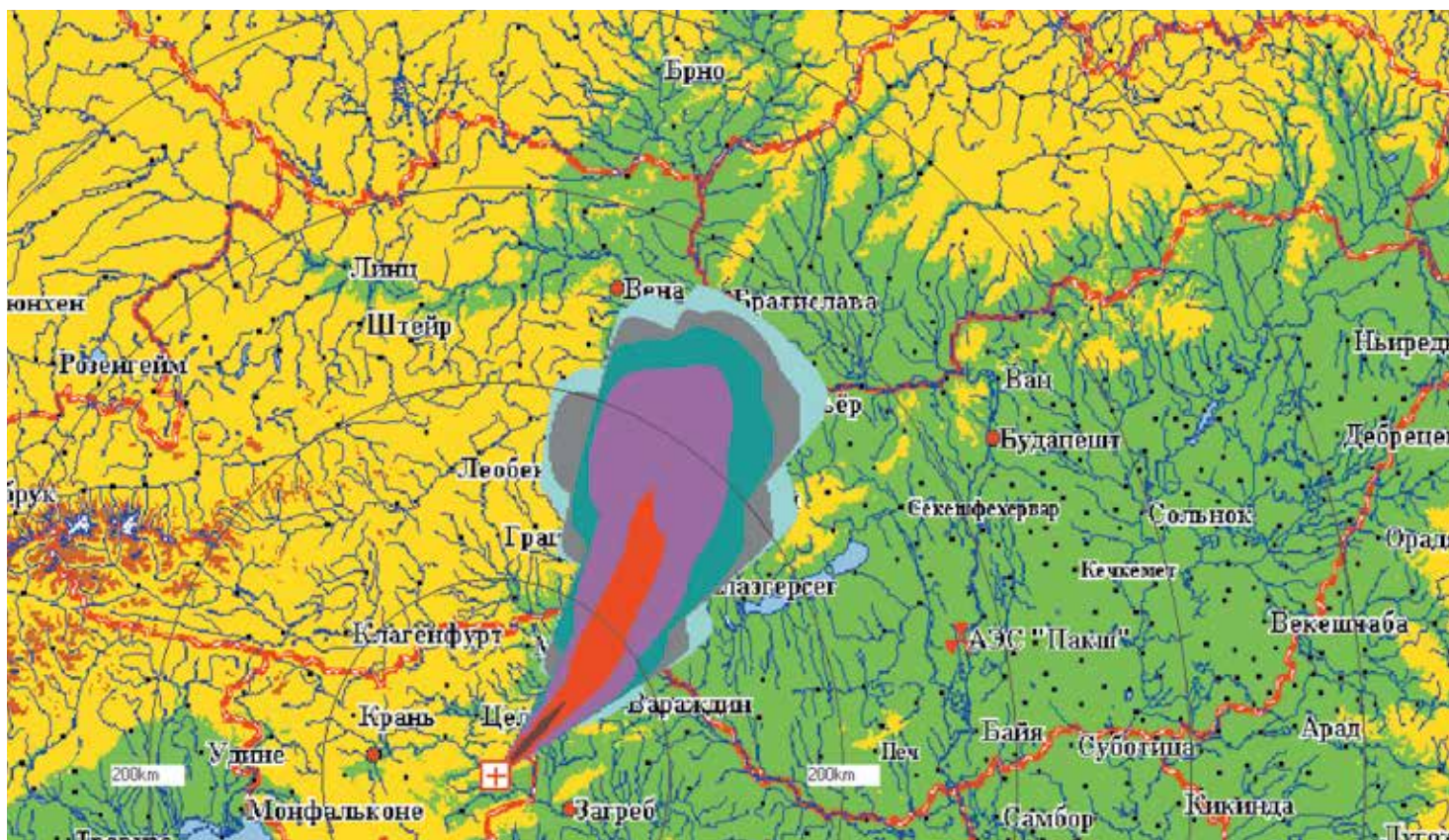
Гипотетические последствия рассеяния ^{137}Cs над Москвой (1–10 граммов)



Площади территорий, требующих вмешательства, в зависимости от критериев принятия решений в случае распыления источника средней активности, содержащего 0,5 г ^{137}Cs , на высоте 100 метров над городом

Социально-экономические и политические последствия умышленного или случайного диспергирования небольшого (на уровне граммов) количества радиоактивных веществ в крупном мегаполисе могут оказаться столь значительными, что это может серьезно повлиять на экономическую ситуацию и условия жизнедеятельности для целых регионов. Оценки, проведенные ИБРАЭ РАН для Москвы и американскими специалистами для Нью-Йорка, показывают, что в случае неадекватной реакции населения на радиационную угрозу ожидаемый ущерб может исчисляться сотнями миллиардов долларов.

Оценки гипотетического ущерба при реализации актов радиологического терроризма в крупных мегаполисах



Угрозы радиационного характера в зонах военных конфликтов

В условиях локальных и региональных военных конфликтов необходимо хорошо понимать риски, связанные с радиационными угрозами, оценивать масштабы их последствий и предусматривать меры, направленные на предупреждение этих угроз. Решение задач предупреждения и минимизации возможных ущербов требует применения современных наукоемких средств оперативной оценки, анализа и прогноза радиационной обстановки в случаях нарушения безопасности ЯРОО, расположенных в зонах боевых действий.

ТКЦ ИБРАЭ РАН был выполнен анализ возможных последствий воздействия на АЭС и ЯРОО, расположенные в зонах военных конфликтов в бывшей Югославии.

Анализ ТКЦ ИБРАЭ РАН возможных последствий от воздействий на АЭС и ИР, расположенных вблизи зоны боевых действий в Югославии (1999 г.)

Научно-техническая поддержка органов управления на федеральном уровне — ключевой элемент обеспечения эффективного реагирования на угрозы радиационного характера и минимизации их последствий.

Социально-экономические аспекты последствий аварий на АЭС



Развитие атомной энергетики подразумевает решение не только научных, технологических, организационных задач, но и широкого спектра проблем социально-экономического характера, обусловленных значимостью атомной энергетики и масштабом возможных последствий аварий на АЭС. Необходимо учитывать интересы населения, осуществляя тесное взаимодействие научных и производственных предприятий отрасли с органами государственной власти и общественностью.



Реализуя комплексный подход к обоснованию безопасности атомной энергетики, ИБРАЭ РАН уделяет большое внимание моделированию и оценке социально-экономических аспектов последствий аварий с радиационным фактором. В рамках этой деятельности Институт:

- активно участвует в деятельности, направленной на разработку современных методик решения социально-экономических, правовых, информационно-просветительских проблем, связанных с использованием атомной энергии;
- осуществляет экспертную и информационно-аналитическую поддержку мероприятий по преодолению последствий радиационных аварий и инцидентов;
- участвует в разработке и реализации мероприятий по информированию общественности и взаимодействию с государственными и общественными организациями.

СИСТЕМНО-АНАЛИТИЧЕСКОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННАЯ ПОДДЕРЖКА ПРОГРАММ ЛИКВИДАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ АВАРИИ НА ЧАЭС

Авария на 4-м энергоблоке ЧАЭС, случившаяся 26 апреля 1986 года, привела к беспрецедентному выбросу радиоактивных материалов в окружающую среду. Радиоактивные выпадения с плотностью свыше 1 Ки/км² по цезию-137 охватили территории Украины, России, Беларуси и территории 17 европейских стран.

К ликвидации последствий аварии и проведению защитных мероприятий было привлечено около 200 тыс. человек. Многие ведущие ученые и специалисты ИБРАЭ РАН принимали непосредственное участие в ликвидации последствий аварии на ЧАЭС — Большов Л. А., Арутюнян Р. В., Линге И. И., Антипов С. В., Бархударов Р. М., Бакин Р. И., Богатов С. А., Гаврилов С. Л., Головизнин В. М., Илюшкин А. И., Каневский М. Ф., Киселев В. П., Меркушов В. П., Павловский О. А., Панченко С. В., Селезнев Е. Ф., Стрижов В. Ф., Скоробогатов А. М., Ткаля Е. В., Чернов С. Ю., Шикин А. В.

Профессор Большов Л. А. возглавлял расчетно-теоретическую группу, обеспечивавшую работу Правительственной комиссии по расследованию причин аварии на ЧАЭС.

*Стрижов В. Ф., Арутюнян Р. В.,
Чернов С. Ю., Большов Л. А.
Машинно-счетная станция,
Чернобыль 1986 г.*

Принятие в 1991 г. Чернобыльского закона, основанного на компромиссных, а по сути ошибочных, критериях отнесения территорий к «пострадавшим», привели к необо-

снованному масштабированию последствий аварии. Это оказало ощутимое воздействие на изменение условий жизни миллионов людей и проблема из чисто радиационной трансформировалась в серьезную социально-экономическую проблему. Обусловленное этим многократное увеличение объема работ по решению комплексных задач преодоления последствий аварии потребовало привлечения значительных материальных и финансовых ресурсов в рамках общегосударственных Чернобыльских программ. Всего за период 1991–2015 гг. реализованы мероприятия пяти таких программ.

В результате выполнения работ по системно-аналитическому обеспечению и информационной поддержке программ преодоления последствий аварии на Чернобыльской АЭС ИБРАЭ РАН в 1992–1996 гг. был создан





Награждение сотрудников ИБРАЭ – участников ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС, РАН, 22 мая 1997 года

Программа расчетно-теоретической группы Большова Л. А.

Центральный банк обобщенных данных (ЦБОД), предназначенный для анализа различных аспектов поставарийной ситуации и обеспечения органов государственной власти всех уровней комплексной информацией.

На основе ЦБОД с привлечением десятков научных организаций различных ведомств Институтом была создана Управленческая информационная система «Чернобыль», которая эксплуатировалась в МЧС России в период реализации федеральных целевых программ по преодолению последствий радиационных аварий и катастроф. Отдельные ее подсистемы были установлены в местных органах управления, в различных ведомствах и научных организациях — участниках работ по преодолению последствий аварии на ЧАЭС.

В состав ЦБОД была включена информация по 18 разделам. Основу банка составляет база радиационно-гигиенических данных (радиоактивное загрязнение почвы, дозы внешнего и внутреннего облучения населения, загрязнение продуктов питания и др.), которая поддерживается в актуальном состоянии до настоящего времени на основе интеграции официальной информации Росгидромета и Роспотребнадзора. Эти данные обеспечивают системно-аналитическую поддержку деятельности МЧС России по формированию перечней населенных пунктов, находящихся в границах зон радиоактивного загрязнения вследствие аварии на Чернобыльской АЭС. Начиная с 2014 года указанные сведения включены в состав межведомственной (МЧС России, Росгидромет и Роспотреб-

СОСТАВИТЕЛИ:
"9" "С" 1986 г.

УТВЕРЖДАЮ:
" " " 1986 г.

ПРОГРАММА

расчетно-теоретической группы ИАЭ им. И.В.Курчатова
в г. Чернобыль

Состав группы: Л.А.Большов – руководитель
Р.В.Арутюнян
А.П.Колосников
С.В.Чернов

ЗАДАЧИ ГРУППЫ:

1. Ввод разработанного до выезда программного фонда в персональный компьютер IBM-PC.
2. Расчетно-теоретический анализ топливных процессов в 4-ой блоке и захоронениях.
3. Наполнение архива данных по радиационной обстановке и распространению активности в здании АЭС, на прилегающей и в 30-километровой зоне.
4. Ввод и обработка данных по активности и дозиметрии в IBM-PC.
5. Расчетно-теоретический анализ распространения и миграции топлива в здании АЭС, на прилегающей и в 30-километровой зоне.
6. Экспресс-обработка результатов лицензированных замеров активности воздуха.
6. Выдача рекомендаций представителям ИАЭ для Комиссии.

Составил программу
нач. лаборатории
Л.А.Большов, проф.

10.07.86

Л.А.Большов

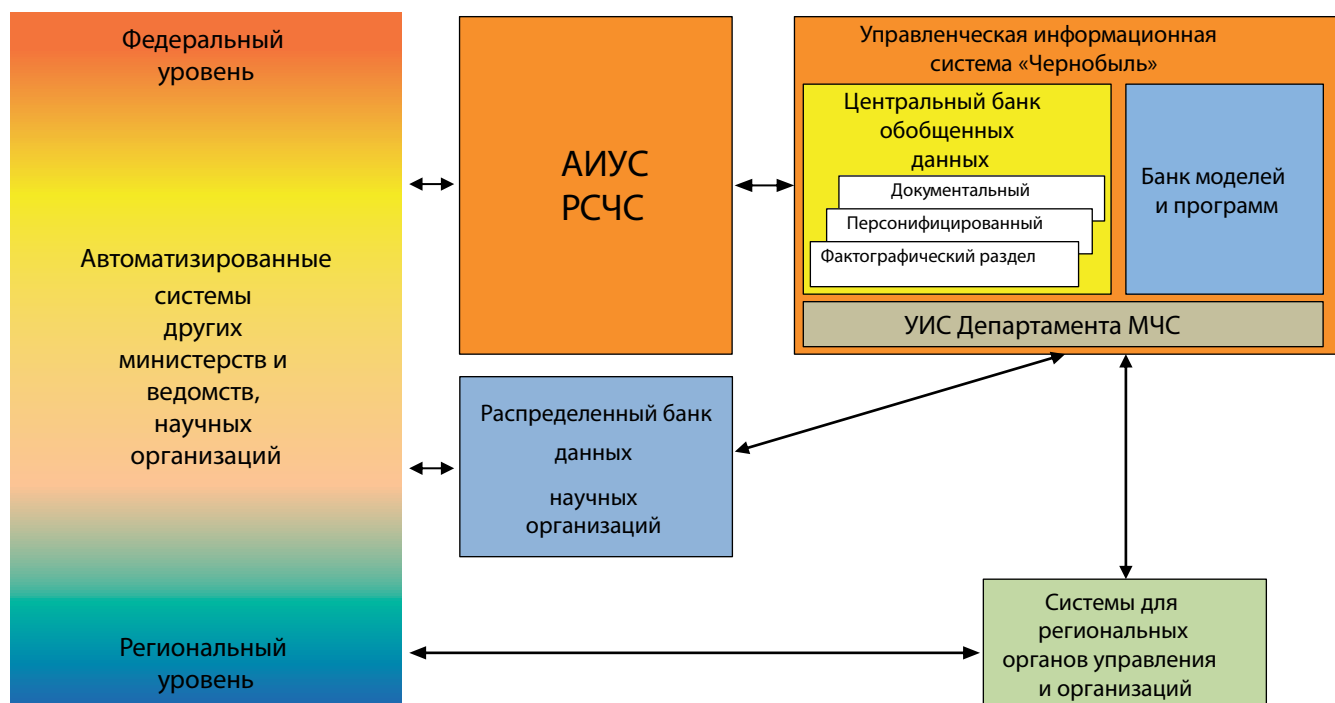


Схема информационного взаимодействия системы «Чернобыль» с другими базами данных

надзор) информационной системы по вопросам обеспечения радиационной безопасности населения и проблемам преодоления последствий радиационных аварий.

Главная страница сайта межведомственной информационной системы по вопросам обеспечения радиационной безопасности населения и проблемам преодоления последствий радиационных аварий



Один из разделов — медико-демографические данные официальной статистики о возрастно-половой структуре населения, смертности по причинам по всем субъектам РФ, начиная с 1982 г. Большой блок информации посвящен социальным вопросам. Это — базы данных по миграции населения, социально-экономическим и социально-психологическим характеристикам затронутых аварией регионов. К этому блоку относился персонифицированный банк данных по участникам ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС, содержащий подробную информацию по 185 тысячам ликвидаторов. Эти данные дополняли сведения, содержащиеся в Российском государственном медико-дозиметрическом регистре, работы по созданию и ведению которого проводились в Обнинском МРНЦ под руководством академика Цыба А. Ф. и Иванова В. К.

В состав центрального банка входят базы электронных карт, банк моделей, комплекс программ обработки и анализа данных. Банк данных включает базу данных по нормативно-технической документации, научным публикациям и публикациям в средствах массовой информации, посвященным чернобыльской проблеме.

Информация из баз данных доступна широкому кругу специалистов. В 2014–2015 годах ИБРАЭ РАН на основе ЦБД совместно с организациями Росгидромета, Минсельхоза России, Рослесхоза разработана и внедрена в МЧС России система планирова-

ния мероприятий и мониторинга за обеспечением радиационной безопасности на радиоактивно загрязненных или находящихся в зонах повышенного радиационного риска территориях Брянской, Калужской, Орловской, Тульской, Челябинской, Свердловской и Курганской областей.

Данные ЦБОД использовались для проведения оценок и прогнозов ситуации на затронутых аварией территориях, подготовки справочных и аналитических материалов для российских национальных докладов по последствиям аварии. ИБРАЭ РАН совместно с МЧС России и другими заинтересованными министерствами и ведомствами были подготовлены пять Российских национальных докладов по итогам и перспективам преодоления последствий чернобыльской аварии.

Оценка доз внутреннего облучения жителей загрязненных территорий

В 1991–1993 гг. при участии ИБРАЭ РАН в рамках реализации российско-германской измерительной программы были определены дозы облучения населения территорий, подвергшихся радиоактивному загрязнению вследствие чернобыльской аварии. Отличительной особенностью измерительной программы явилась комплексность научных исследований. Номенклатура проводимых работ охватывала широкий круг измерений и давала возможность оценить все возможные пути воздействия радионуклидов на организм человека, в том числе через органы дыхания и по пищевым цепочкам. Обследования охватили почти 60 населенных пунктов, расположенных на радиоактивно загрязненных территориях Брянской, Тульской и Калужской областей общей площадью около 100 тыс. км². Основное внимание было уделено измерениям на установках СИЧ доз внутреннего облучения жителей этих территорий. Были обследованы более 160 тыс. человек (из них около 50% — жители Брянской области).

Итоги 20-летнего изучения закономерностей формирования доз внутреннего облучения населения, включая и результаты российско-германской измерительной программы, были подведены на проведенном в 2006 году в ИБРАЭ РАН международном семинаре «Оценка доз облучения жителей Брянской области на основе измерения содержания цезия-137 в организме облучаемого контингента».

Участие ИБРАЭ РАН в реализации российско-белорусских чернобыльских программ

Начиная с 1998 года в решении чернобыльской проблемы Российская Федерация тесно взаимодействует с Республикой Беларусь. Основной целью первых российско-белорусских программ было формирование и совершенствование согласованных элементов и механизмов нормативного правового регулирования совместной деятельности России и Беларуси по преодолению последствий чернобыльской аварии.

В рамках работ по информационно-аналитическому обеспечению совместных действий в 1998–2005 гг. специалистами ИБРАЭ РАН совместно с Гомельским институ-



Публикации ИБРАЭ РАН по чернобыльской тематике

том радиологии был создан единый российско-белорусский банк данных по основным аспектам чернобыльской катастрофы. В 2003–2010 гг. на базе и при технической поддержке ИБРАЭ РАН функционировал российско-белорусский информационный центр (РБИЦ), целью деятельности которого являлась информационно-аналитическая поддержка реализации мероприятий программы, выработка и проведение единой информационной политики по чернобыльским проблемам в рамках Союзного государства, минимизация социально-психологических последствий чернобыльской катастрофы, преодоление постчернобыльского стресса и обеспечение высокой эффективности всего комплекса программных мероприятий путем улучшения общественного восприятия и информированности общественности. Специалисты ИБРАЭ РАН принимали участие в организации и проведении мониторинга социально-психологической обстановки на радиоактивно загрязненных территориях России (Брянская, Калужская, Орловская и Тульская области) и Беларуси (Гомельская область).

В соответствии с «Программой совместной деятельности по преодолению последствий чернобыльской катастрофы в рамках Союзного государства», в 2006–2009 гг. белорусскими и российскими специалистами выполнена большая и важная работа по подготовке и выпуску «Атласа радиоактивного загрязнения территорий Беларуси и России», включающего не только ретроспективные и современные, но и прогнозные карты. Сопредседателями редакционной коллегии Атласа выступили академик РАН Израэль Ю. А. и академик НАН Республики Беларусь Богдевич И. М. В состав редакционной коллегии и рабочей группы по созданию Атласа входили специалисты ИБРАЭ РАН — Большов Л. А., Арутюнян Р. В., Линге И. И., Симонов А. В., Скоробогатов А. М.

В рамках «Программы совместной деятельности по преодолению последствий чернобыльской катастрофы в рамках Союзного государства на период до 2016 года» ИБРАЭ РАН совместно с Гомельским институтом радиологии на основе результатов комплексного исследования хозяйственного состояния территорий, подвергшихся радиационному воздействию вследствие аварии на ЧАЭС, подготовлен проект единой стратегии содержания и управления отселенными территориями Беларуси и России. Специалисты института принимали непосредственное участие в выполнении комплекса мероприятий по совершенствованию системы взаимодействия МЧС России и МЧС Республики Беларусь при ликвидации чрезвычайных ситуаций на радиоактивно загрязненных территориях, включая работы по развитию и унификации сов-



Онлайн-семинар в пресс-центре МЧС России по итогам проведения интернет-акций на радиоактивно загрязненных территориях Брянской и Челябинской областей (17.09.2013)



Представители МАГАТЭ знакомятся с деятельностью обучающихся программ РО РБИЦ



Ознакомление с работой НЦУКС МЧС России членов Наблюдательного совета Программы совместной деятельности по преодолению последствий чернобыльской катастрофы в рамках Союзного государства на 2006–2010 годы (23.09.2009)



местной инфраструктуры реагирования, оповещения и информирования населения о чрезвычайных ситуациях, связанных с радиационным воздействием на население приграничных территорий России и Беларуси.

Награждение сотрудников-ликвидаторов в связи с 30-летней годовщиной аварии на ЧАЭС

В 2017–2018 гг. МЧС России при участии ИБРАЭ РАН и других организаций подготовлен проект концепции Программы Союзного государства «Совершенствование подходов к аварийной готовности, аварийному реагированию и регулированию безопасности при использовании атомной энергии».

Радиационное обследование паросилового цеха, Е. Л. Серебряков, Красноперов С. Н., Гаврилина Е. А., Павловский О. А., г. Электросталь, 2013 г.

Выполнение многолетних работ по системно-аналитическому сопровождению программ преодоления последствий аварии на ЧАЭС позволило ИБРАЭ РАН накопить уникальный опыт, который в настоящее время используется при функционировании ЦНТП ИБРАЭ РАН для решения задач научно-технической поддержки федеральных органов исполнительной власти (МЧС России, Минобороны России) и ГК «Росатом» в сфере обеспечения готовности к реагированию на радиационные аварии и инциденты. Этот опыт оказался востребован в случаях аварии на АЭС «Фукусима-1» (2011 г.) и радиационного инцидента в г. Электросталь (2013 г.).



АНАЛИЗ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОСЛЕДСТВИЙ АВАРИИ НА АЭС «ФУКУСИМА-1»



Арон Дмитрий Викторович

н.с. лаборатории разработки
программных комплексов поддержки
принятия решений

«Выработка решений по действиям на любой стадии радиационной аварии на основе предварительного или оперативного прогнозирования их социальных и экономических последствий является требованием российского законодательства и соответствует международным рекомендациям в области ядерной и радиационной безопасности. Внедрение в практику систем и принципов комплексного анализа последствий радиационного воздействия на население и территории позволит минимизировать экономические и социальные ущербы и избежать неоправданного вовлечения людей и территорий в мероприятия, связанные с ликвидацией последствий радиационных инцидентов».

Специалистами ТКЦ (с 2013 г. — ЦНТП) ИБРАЭ РАН проведено аналитическое исследование радиологических, экономических и медико-биологических аспектов массовой эвакуации населения после аварии на АЭС «Фукусима Дайичи». Показано, что адекватные радиоэкологическим последствиям аварии финансовые затраты на эвакуацию людей из зоны отселения АЭС не превышают 200 млн долл. США. Основаниями для такой оценки являются выполненная в ИБРАЭ РАН реконструкция радиационной обстановки в префектуре Фукусима на 1 июня 2011 г., статистические данные о численности населения, покинувшего свои дома в ходе эвакуации, и предписанные нормами радиационной безопасности соответствия предотвращаемой коллективной дозы облучения населения величине потенциального экономического ущерба (в финансовом эквиваленте).

Между тем, на сегодня затраты, связанные с ликвидацией последствий аварии, оцениваются, по разным источникам, в сумму от 100 до 200 млрд долл. (т. е., на 3 порядка выше), и во многом обусловлены популистским характером управленческих решений, принятых правительством Японии, и неадекватностью их реальным радиологическим рискам. Например, проведенные в ЦНТП ИБРАЭ РАН оценки дозовых нагрузок для населения показали, что 4/5 всех эвакуированных после аварии лиц могли бы безо всякого ущерба для здоровья продолжать жить в своих домах.

К концу 2017 года в ИБРАЭ РАН в рамках работ по мониторингу ликвидации последствий аварии на АЭС «Фукусима-1» в Японии была разработана детальная база данных (БД) по территории префектуры Фукусима на пространственной сетке разрешением до 100 м, включающая доступную к настоящему моменту статистическую информацию по демографии, экономике, реализации мероприятий по эвакуации и реабилитации на пострадавших территориях, а также включающая данные по динамике радиационной обстановки. В отличие от базы данных, собранной в 2011 году, она представляет собой реляционную БД, которая не использует для расчетов ресурсы геоинформационной системы, а любые вычисления в ней могут производиться через инструмент пользовательских запросов. Это позволяет получать требуемые результаты в течение нескольких минут (или немногим дольше в случае, если предварительно требуется подготовить границы для новой исследуемой зоны).

Существующая ныне база данных по радиационной обстановке, социальным и экономическим показателям на территории префектуры Фукусима включает описание более 1,3 млн участков, по каждому из которых приведены сведения о численности населения, типе основного землепользования, количеству зданий, около 70 других финансовых показателей, данные по изменению мощности дозы



гамма-излучения (по 27 записей за период с апреля 2011 года) и результаты расчета индивидуальных доз облучения жителей за различные периоды времени.

По результатам работы с базой были получены оценки по численности населения на пострадавших и эвакуированных территориях, ожидаемые либо предотвращенные за счет эвакуации значения коллективной дозы облучения населения, оценки материального ущерба за счет временного или постоянного отселения жителей и приостановления экономической деятельности. Была рассчитана эффективность реализованных мероприятий с учетом предотвращенной за счет их проведения дозы облучения населения. Расчеты проводились для всех зон эвакуации и отселения, установленных в 2011 году и к концу 2017 года, соответственно. Получены распределения по ожидаемым индивидуальным дозам облучения жителей для некоторых зон эвакуации. Были также исследованы возможные альтернативные варианты проведения эвакуации в 2011 году в зонах с ожидаемыми индивидуальными дозами для населения в 20, 50 и 100 мЗв за первый год после аварии и проведены расчеты ожидаемых сопутствующих экономических и гуманитарных эффектов, что позволило оценить влияние выбранных радиационных критериев эвакуации на ожидаемые уровни ущерба.

Рассчитанный по результатам анализа сложившейся к 2017 году ситуации с эвакуацией и дезактивацией в префектуре Фукусима экономический ущерб для государства и населения сравнивался с официальными данными по затратам на проведение дезактивации и доступными данными по суммам компенсаций, выплачиваемых населению со стороны государственных и частных компаний в связи с аварией на АЭС. На данный момент сложно говорить о точности совпадений результатов расчетов ИБРАЭ РАН с официальными данными по той причине, что последние публикуются нерегулярно и не позволяют построить четкую картину по всем статьям рассматриваемых прямых затрат, связанных с проведением противоаварийных мер. Фактически, детальная картина текущих или планируемых затрат так и не была опубликована японской стороной к настоящему времени.

Совещание группы экспертов ТКЦ ИБРАЭ РАН по результатам прогноза развития аварийной ситуации на АЭС «Фукусима», слева направо: Серебряков Е. Л., Меркушов В. П., Зарянов А. В., Арон Д. В., Бакин Р. И., к.т.н. Павловский О. А., Красноперов С. Н., Шикин А. В., Фокин А. Л., Капустин А. В., Томащук Д. Ю., к.ф.-м.н. Припачкин Д. А., Панченко С. В., д.ф.-м.н. Арутюнян Р. В.

Ген. директор ГХК Гаврилов П. М., д.ф.-м.н. Арутюнян Р. В. во время посещения кризисного центра АЭС «Фукусима-1», 2015 г.



ИНФОРМИРОВАНИЕ ОБЩЕСТВЕННОСТИ



Мелихова Елена Михайловна

к.ф.-м.н., зав. лабораторией проблем коммуникации при оценке рисков

«Среди важнейших задач Института — информирование органов законодательной и исполнительной власти, а также широкой общественности о результатах анализа радиационных рисков при использовании атомных технологий и о том месте, которое эти риски занимают на единой шкале техногенных рисков. В этой работе участвуют не только специалисты ИБРАЭ, но и эксперты ведущих научных учреждений Минздрава, Роспотребнадзора, РАМН, РАСХН, МЧС».

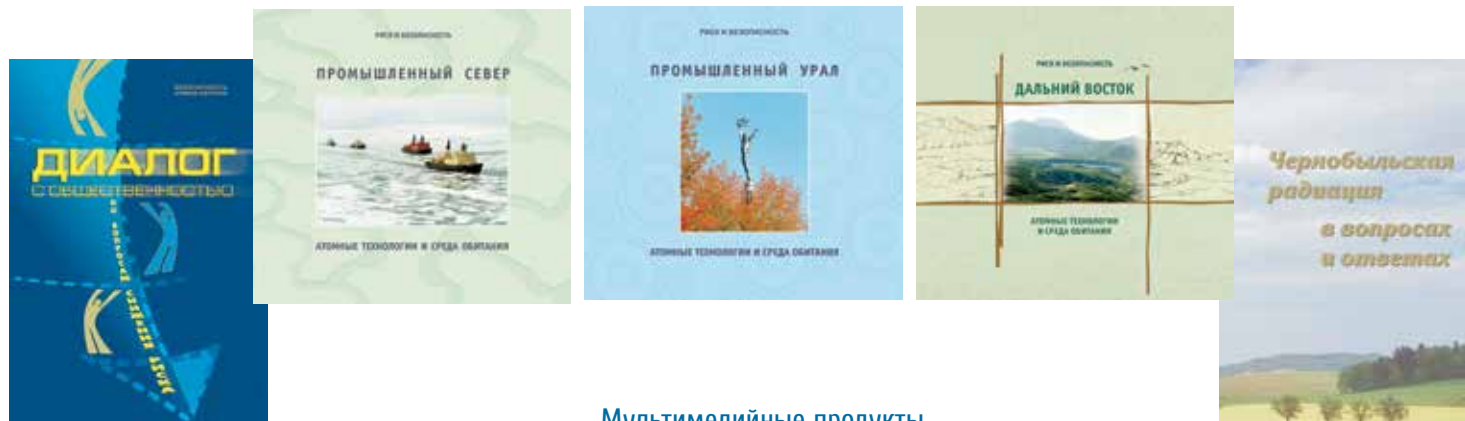
Особое отношение общества к радиационной опасности проявилось в самом начале работ по чернобыльской тематике. Перемены в системе государственного управления в СССР в 1986–1988 гг. обусловили развитие и активизацию популистских подходов к выбору уровней вмешательства при решении задач по преодолению последствий чернобыльской аварии. Научно-обоснованные предложения ведущих российских ученых по оптимизации радиационной защиты населения и территорий на среднесрочную перспективу отвергались общественностью как «антигуманные». Принятый в 1991 году союзный закон «О социальной защите граждан, пострадавших вследствие чернобыльской катастрофы» закрепил неоправданно жесткие критерии зонирования, в результате многократно выросла площадь территорий со статусом «радиационно-загрязненные» и на порядок увеличилось количество жителей, затронутых мерами вмешательства, со всеми вытекающими последствиями социально-экономического плана.

Особое восприятие опасности техногенного облучения в дозах, сопоставимых с природным фоном и даже много меньших, характерно для всех слоев общества независимо от возраста, образования, профессии, социального положения и места проживания. Этот феномен наблюдается во всех странах. На государственном уровне он проявляется в том числе «особым» подходом к регулированию радиационных рисков в диапазоне малых и сверхмалых доз.

Понимая, что гигантский разрыв между общественным восприятием и научным знанием во многом определяет уровень общественной приемлемости атомных технологий, ИБРАЭ РАН включил в число своих приоритетных задач информирование органов законодательной и исполнительной власти о результатах анализа радиационных рисков при использовании атомных технологий и разработку соответствующих информационных материалов для широкой общественности.

В 2001 году в Институте была создана лаборатория проблем коммуникации при оценке риска. Кроме разработки информационно-просветительских и образовательных продуктов для широкой общественности, лаборатория занимается углубленным анализом механизмов формирования социально-экономических последствий тяжелых аварий и проблем восприятия радиационного риска при нормальной эксплуатации и при авариях на ЯРОО, готовит рекомендации для органов власти и органов управления, разрабатывает учебные пособия и проводит научно-практические семинары и информационных тренировки по тематике аварийного информирования населения для специалистов информационных подразделений Росатома и МЧС России.

Информационно-просветительские и образовательные продукты, рекомендации для органов власти и органов управления



Мультимедийные продукты



Цифровизация и управление жизненным циклом объектов атомной энергетики, продукции машиностроения и программных комплексов



*Направление цифровизации и управления
жизненным циклом появилось в ИБРАЭ РАН
в 2011 году. В настоящий момент данное
направление активно развивается в рамках
отдела проблем управления жизненным циклом
объектов атомной энергетики.*

*Основной специализацией научных исследований
отдела являются технологии управления
жизненным циклом сложных технических
объектов, информационные системы
управления жизненным циклом (PLM-системы)
и методология внедрения этих систем на
промышленных предприятиях.*



В Институте активно проводятся исследования по применению различных компонентов PLM (Product Lifecycle Management) систем и их интеграции между собой для построения единого информационного пространства предприятия. К ним относятся:

- системы автоматизированного проектирования (САПР; CAD — Computer Aided Design).
- системы управления данными об изделии (PDM — Product Data Management).
- системы управления расчетными данными (SPDM — Simulation Process and Data Management).
- системы оперативного управления производством (MES — Manufacturing Execution System).
- системы сбора и мониторинга оборудования (MDC — Manufacturing Data Collection).
- системы управления активами предприятия, в том числе техническим обслуживанием и ремонтом оборудования (EAM — Enterprise Asset Management).



Пономарев Владимир Николаевич

д.ф.-м.н., заместитель директора
по стратегическому развитию
и инновациям ИБРАЭ РАН

«Наше государство в последнее время уделяет «цифровой» тематике очень большое внимание. Это связано с теми конкурентными преимуществами, которые применение цифровых технологий может дать нашей промышленности, инфраструктуре, социальной сфере, госуправлению и стране в целом. Другим необходимым условием повышения эффективности и, соответственно, конкурентоспособности является переход к проектному управлению, а технологии управления жизненным циклом являются одним из важнейших инструментов проектного управления. Мы в ИБРАЭ РАН почувствовали перспективы цифровизации и связанных с ней технологий управления жизненным циклом достаточно давно, когда стали формировать и активно развивать данное направление. Сейчас мы можем с уверенностью говорить о том, что эти научные исследования и практические работы начинают приносить плоды и позволяют участвовать в масштабных проектах, ведущихся у нас в стране в атомной отрасли и за ее пределами».

Команда отдела начала формироваться в 1999 году. В настоящий момент она насчитывает более 20 высококвалифицированных специалистов, обладающих знаниями и опытом выполнения проектов любой сложности, и включает руководителей проектов, бизнес-аналитиков, программистов, технических писателей и тестировщиков. За прошедшее время было освоено внедрение многих распространенных в России PDM-систем: Search/IPS, Windchill, Lotsia PDM PLUS, ЛОЦМАН:PLM, PDM STEP Suite.

Наряду с научными знаниями накоплен огромный практический опыт по реализации реальных проектов внедрения PLM-систем на отечественных предприятиях. За период деятельности отдела было выполнено более 100 проектов по внедрению различных PLM-систем и их компонентов на ведущих предприятиях Росатома, Роскосмоса, Ростеха (КРЭТ, ОПК), концерна «Алмаз-Антей», Трансмашхолдинга и других.

Сотрудниками отдела опубликовано более 100 научных работ по данной тематике, в том числе несколько монографий.

Деятельность отдела характеризует высокая практическая направленность результатов: подавляющее большинство научных исследований проводятся в рамках работ по созданию реальных информационных систем. Мы всегда руководствуемся одним главным принципом — цифровизация должна приносить предприятию реальную пользу, автоматизация ради автоматизации никому не нужна. При внедрении информационной системы мы всегда задаемся вопросами «что мы делаем» и «зачем мы это делаем», благодаря этому мы стараемся помочь предприятию работать эффективнее. Другим нашим принципом является комплексность подхода к внедрению систем. С одной стороны, это означает создание на предприятии системы «под ключ», т. е. мы выступаем в роли системного интегратора. С другой стороны, комплексный подход позволяет избежать «лоскутной автоматизации», наши проекты ориентированы на «бесшовную» интеграцию различных систем предприятия между собой.



Слева направо: Марков А. С., Сумароков С. В., д.ф.-м.н. Пономарев В. Н.

ТЕХНОЛОГИИ ЦИФРОВИЗАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ

Основные принципы

Любая современная организация, имеющая дело со сложной наукоемкой продукцией (будь то продукция машиностроения или программное обеспечение), неизменно сталкивается с одними и теми же условиями своей деятельности: необходимо обеспечивать требуемое заказчиками качество своей продукции, соблюдая при этом сроки разработки и поставки, стоимостные ограничения на разработку и производство продукции и дополнительные требования к продукции и процессам ее жизненного цикла от различных регулирующих органов. К числу ключевых параметров качества относятся, например, функциональность, эргономичность, габаритно-массовые характеристики, отказоустойчивость, ремонтпригодность, а также такие экономические характеристики, как цена и общая стоимость владения продукцией.

Общемировая тенденция в области наукоемкой продукции состоит в постоянном повышении сложности изделий при одновременном сокращении сроков их разработки и постановки на производство и увеличении требований как со стороны заказчиков, так и со стороны регулирующих органов, тогда как финансовые ресурсы на выполнение проектов во все времена были ограничены. В этих условиях естественным ответом, позволяющим предприятию все-таки соблюсти требования по качеству, срокам и стоимости, является переход к такой организации своей работы, при которой контроль степени соблюдения этих ключевых параметров должен осуществляться на постоянной основе, после выполнения каждого этапа работы над продукцией. Таким образом, в самом начале жизненного цикла необходимо разработать и формализовать набор требований к продукции, после чего контролировать степень соблюдения этих требований: после проведения НИР, после разработки конструкторской документации, после выполнения проектных работ, после разработки технологии производства, после изготовления и испытания опытного образца и т.д. При этом каждое требование описывается в виде характеристики и допустимого интервала ее значений, а также способов расчета значения характеристики и ограничений по применяемым для этого расчетным системам или условиям проведения экспериментов.

Такой подход требует постоянной работы с большими массивами информации об изделии, процессах его жизненного цикла и производственной и эксплуатационной среды изделия. Превалирующие в настоящее время подходы к управлению информацией сводятся либо к главенству «бумажного» представления информации и использованию компьютерных систем в качестве средства создания бумажного документа, либо к применению отдельных информационных систем, которые также не позволяют решать поставленные задачи. Ключевыми недостатками «бумажного» подхода является физическая невозможность для человека обработать такие большие массивы информации и, кроме того, некоторые данные об изделии могут



Сумаров Сергей Вячеславович

заведующий отделом проблем управления жизненным циклом объектов атомной энергетики ИБРАЭ РАН

«В нашем понимании, основная польза цифровизации состоит в том, что она предоставляет предприятию возможность оптимизации своей деятельности, продукции, процессов ее жизненного цикла и окружающей продукцию среды путем их компьютерного моделирования и анализа на всех этапах жизненного цикла. Таким образом, в основе цифровизации лежат, с одной стороны, компьютерные модели продукции, процессов жизненного цикла и окружающей среды, а с другой стороны, технологии управления жизненным циклом, позволяющие правильно применять данные модели. Исходя из этих принципов, мы строим наши научные исследования в стремлении охватить основные компоненты PLM-систем и, самое главное, рассмотреть их взаимодействие в едином комплексе.

Особое внимание мы уделяем изучению эффектов от внедрения систем управления жизненным циклом и возможностей по совершенствованию, которые появляются у предприятия, когда оно проходит цифровую трансформацию».

	Задачи любого предприятия • Обеспечить требуемое качество продукции • Соблюсти сроки разработки/производства • Остаться в рамках бюджета
	Качество = соблюдение требований к продукции • Требование = характеристика + диапазон допустимых значений + способы измерения характеристики • Способы измерения зависят от этапа ЖЦ продукции
	В самом начале ЖЦ необходимо разработать формализованные требования к изделию и поддерживать их в актуальном состоянии в дальнейшем
	Необходимо регулярно контролировать степень соответствия требованиям, срокам и бюджету и вовремя принимать управленческие решения

Подходы к управлению требованиями

быть представлены только в электронном виде и никак иначе (например, 3D-модели). Недостатками существующих на предприятиях информационных систем чаще всего являются разбросанность данных по разным системам, хранение одних и тех же данных в разных системах (что приводит к неизбежному появлению противоречий между ними) или неполноте построенных электронных информационных моделей. Любой из перечисленных вариантов управления данными не позволяет в полной мере решать задачи по постоянному контролю соблюдения требований к изделию, сроков и стоимости работ в силу невозможности быстро и качественно собрать нужную для принятия решения информацию, которая была бы полной, непротиворечивой и отражала бы реальную картину. К тому же, описанные выше процессы работы с данными сами создают заметные стоимостные и временные издержки, влияющие на экономику проекта, а некачественные данные могут стать источником снижения качества самого изделия, например, привести к появлению брака в производстве.

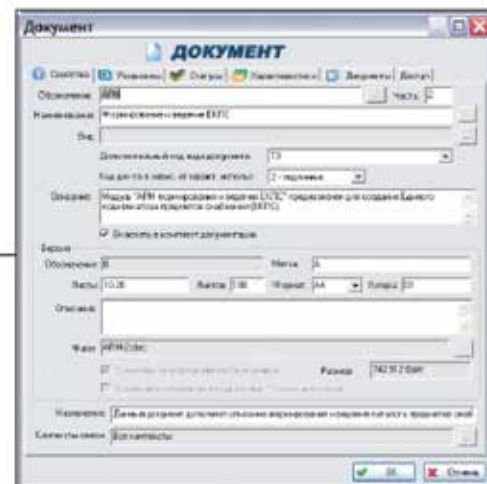
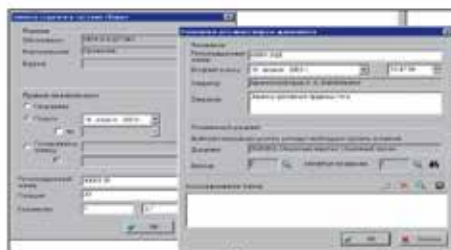
Цифровизация деятельности предприятия является неизбежным способом решения обозначенных проблем. Речь идет о создании и использовании в деятельности организации так называемых «цифровых прототипов» изделий, процессов жизненного цикла, производственной и эксплуатационной среды изделий, а также об организации деятельности предприятий в соответствии с концепцией «Индустрии 4.0». Циф-

ровой прототип представляет собой максимально полное электронное описание изделия/процесса/среды, причем информация в нем является структурированной, связанной и взаимосогласованной. Идея применения цифрового прототипа на этапах проектирования и разработки изделия, а также разработки процессов его производства и эксплуатации, проста — перед тем, как переходить к физическому изготовлению изделия или его эксплуатации, необходимо построить его компьютерную модель и провести на ней максимально возможный комплекс расчетов для определения степени соблюдения требований к изделию, а также стоимостных и временных параметров производства и эксплуатации. По итогам такого анализа обязательно будут выявлены ошибки и возможности для оптимизации, которые в противном случае проявились бы на более поздних этапах жизненного цикла. Примерами являются: анализ изделия на собираемость и соответствие геометрических размеров, прочностные, тепловые, вибрационные расчеты, моделирование производственной, логистической и эксплуатационной среды. Все это полностью согласуется с обозначенной ранее идеей постоянного контроля за соблюдением требований, сроков и стоимостных характеристик изделий. Безусловно, современные предприятия уже сейчас частично проводят такие испытания; разница состоит в том, что теперь для испытаний предлагается использовать логически единый цифровой прототип. Другой важной особенностью цифрового прототипа является его

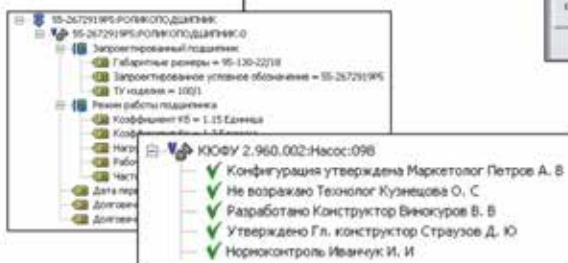
История изменений

Документация (CAD-модели, чертежи)

ЭСИ



Конструкторская информационная модель



Атрибутивная информация

Структура конструкторской
информационной модели
(часть цифрового
прототипа изделия)



Применение
киберфизических
систем



Интернет вещей



Большие данные



Искусственный
интеллект



Аддитивные
технологии
производства



Применение
композитных
материалов



И другие...

Основные тренды
Индустрии 4.0

легитимность как единственного источника информации, причем представлена эта информация исключительно в электронном виде.

Что касается этапов производства и эксплуатации, то здесь речь идет об организации сбора информации с изделия и окружающих его объектов при помощи разнообразных датчиков и аккумулировании собранных данных в цифровой прототип (прежде всего, данных о ходе производства изделия, параметрах его эксплуатации, обслуживания и ремонта). С одной стороны, это обеспечит разработчику и изготовителю возможность обратной связи, помогающей им улучшать свои изделия. С другой стороны, анализ параметров изделия в процессе эксплуатации позволит перейти к обслуживанию и ремонту «по состоянию», а не «по регламенту», что является более эффективным. Кроме того, подобный подход в рамках идеологии «Индустрии 4.0» открывает путь к построению так называемых «киберфизических систем», являющихся основой четвертой промышленной революции и позволяющих выполнять сложные производственные и эксплуатационные процессы практически без участия человека, что экономит ресурсы и позволяет избежать влияния пресловутого «человеческого фактора». Помимо исключения человека из производственного процесса как «рабочих рук», такие системы берут на себя и оперативное управление процессом.

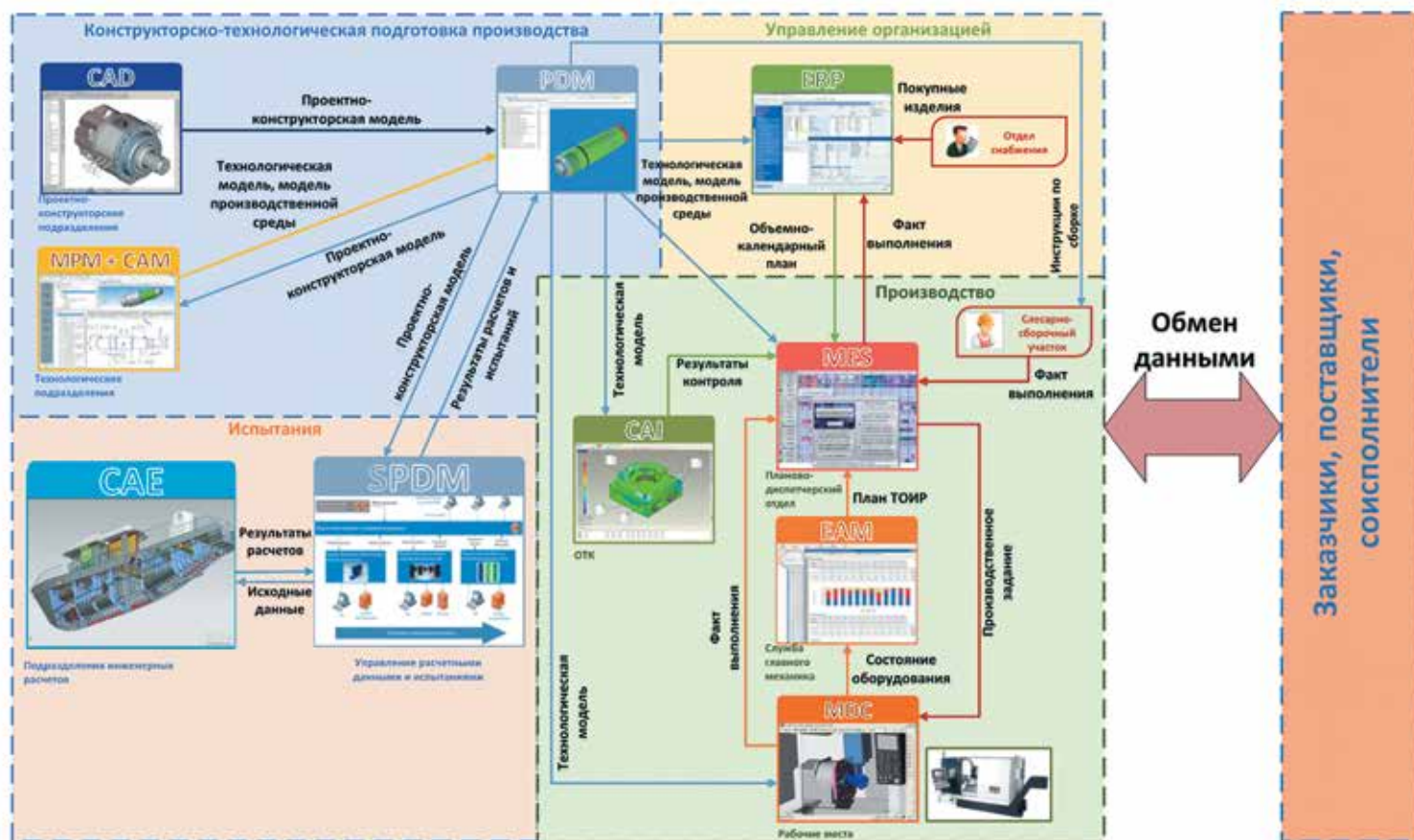
Киберфизическая система представляет собой совокупность датчиков, изделий, оборудования и информационно-управляющих систем, взаимодействующих между собой по стандартным правилам без участия человека. Примером такой системы являются «безлюдные» заводы, которых в мире строится все больше. В киберфизической системе все элементы взаимодействуют между собой для достижения заранее заданного результата (скажем, производства изделия), а информационно-управляющие системы организуют управление этим процессом, собирая информацию с датчиков и выдавая управляющие воздействия на механизмы. Киберфизическая система и все входящие в нее компоненты должны быть «умными», т.е. обладать возможностью адаптации к изменяющимся внешним условиям (изменение производственной программы, корректировка конструкции изделия, форс-мажорные факторы типа поломки оборудования и т.п.). При этом подобные системы опираются в своей работе на постоянно дополняемые цифровые прототипы изготавливаемых изделий, промышленного оборудования и других значимых элементов окружающей среды. То же самое справедливо и для этапов эксплуатации изделий.

Информационные системы управления жизненным циклом

Для организации деятельности предприятия с применением технологии цифровых прототипов необходимо создание соответствующей информационной системы — системы управления жизненным циклом продукции (PLM-системы), основанной на технологии цифровых прототипов. Такая система должна использовать все имеющиеся на настоящий момент возможности программных платформ для управления жизненным циклом, но при этом идеологически должна быть построена с упором на цифровой прототип и решение упомянутых выше задач обеспечения требуемого качества, сроков и стоимости продукции. Система должна учитывать организационную структуру предприятия и ее внешнее окружение, быть распределенной, чтобы обеспечить совместную работу всех филиалов и удаленных площадок, а также способной организовать качественное информационное взаимодействие с подрядчиками и заказчиками предприятия. Программная архитектура системы управления жизненным циклом продукции на основе технологии цифровых прототипов представлена на рисунке справа.

PLM-систему недостаточно просто установить на рабочих местах и научить сотрудников использовать ее функциональность — ее необходимо внедрять. Причина в том, что PLM-система представляет собой инструмент организации работы, который необходимо настраивать под те рабочие процедуры, которые приняты на предприятии. По статистике, менее 50% проектов по внедрению информационных систем на предприятиях заканчиваются успешно. В остальных случаях имеют место такие негативные факты, как неудовлетворение руководства и/или конечных пользователей результатами проекта, превышение сроков и бюджета проекта, либо все это в совокупности.

Подобные неудачи, как правило, имеют несколько причин, но чаще всего связаны с отсутствием методики внедрения, недостаточным опытом участников процесса, неадекватным выбором программно-технических средств, отсутствием организационной поддержки со стороны руководства и, очень часто, недостаточным финансированием. Для обеспечения успеха необходимы в первую очередь, наличие проверенной методики, четко оговаривающей ожидаемый результат внедрения и все шаги, которые требуется предпринять для его достижения, а также наличие команды, имеющей успешный опыт внедрения подобных систем на других предприятиях.



Программная архитектура PLM-системы

Результатом внедрения является PLM-система, которая включает в себя:

- перепроектированные бизнес-процессы и структуры данных предприятия (адаптированные под работу в электронном виде);
- специализированное программное обеспечение (САПР, PDM и другие системы);
- системное программное обеспечение (ОС, СУБД, офисные пакеты, системы ЭЦП);
- аппаратное обеспечение (серверы, ЛВС, рабочие станции, периферийное оборудование);
- кадровое обеспечение (подготовленные к работе пользователи);
- нормативно-методическое обеспечение (стандарты предприятия (СТП), классификаторы, справочники);
- юридическое обеспечение (юридическая чистота использования электронных данных, в том числе организационные механизмы ЭЦП).

Работа по внедрению включает в себя:

- перепроектирование бизнес-процессов и структур данных предприятия;
- определение требований к компонентам PLM-системы и их взаимная увязка;
- выбор программного и аппаратного обеспечения (в особенности, специализированного ПО) из имеющегося на рынке;
- настройку специализированного ПО под бизнес-процессы и структуры данных предприятия;
- настройку системного ПО и аппаратного обеспечения;
- подготовку кадров;
- корректировку СТП;
- выверку классификаторов и справочников;
- решение юридических вопросов;
- решение внутренних организационных вопросов предприятия по вводу системы в действие (в том числе, вопросов мотивации сотрудников).

НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПРОЕКТЫ

Информационная система управления данными жизненного цикла проектного направления «Прорыв»

0 проекте

Информационная система управления данными жизненного цикла (ИСУЖЦ) проектного направления «Прорыв» является примером системы управления ЖЦ сложного технического объекта. В создании и внедрении ИСУЖЦ активно участвуют сотрудники отдела №14 ИБРАЭ РАН.

Назначение ИСУЖЦ

ИСУЖЦ является частью единого информационного пространства проектного направления «Прорыв». Назначением системы является:

- организационно-техническое сопровождение управления ПН «Прорыв», НИР и ОКР, разработки и производства оборудования, сооружения объектов (планирование, отчетность, контроль, обеспечение качества, электронный документооборот с управлением изменениями, рецензированием, согласованием и утверждением документов);
- сохранение создаваемой в ходе проектов интеллектуальной собственности;
- формирование информационных моделей объектов;
- сопровождение эксплуатации объектов в течение всего жизненного цикла, включая вывод из эксплуатации и утилизацию отходов.

Формирование информационной модели проектного направления «Прорыв».

Пример наполнения ИСУЖЦ информацией, включающей в себя связанные друг с другом 3D-модели, информационные структуры, техническую документацию и т. д.



Структура ИСУЖЦ

ИСУЖЦ реализуется на базе программной PLM-платформы PTC Windchill. ИСУЖЦ включает в себя следующие основные функциональные подсистемы, разработанные сотрудниками ИБРАЭ РАН:

- подсистема для формирования электронной структуры объектов в разных представлениях (архитектурно-строительное, функционально-технологическое);
- электронный архив технической документации;
- подсистема управления результатами ПН «Прорыв»;
- подсистема управления расчетными данными;
- база данных расчетных кодов;
- система кодирования документации ПН «Прорыв»;
- подсистема информационной поддержки мониторинга и управления сооружением ОДЭК;
- подсистема информационной поддержки технического обслуживания и ремонта оборудования ОДЭК.

В рамках внедрения ИСУЖЦ были разработаны специальные регламенты, в соответствии с которыми с помощью разработанных подсистем происходит наполнение ИСУЖЦ информацией и формирование информационной модели (ИМ)

ПН «Прорыв». ИМ Прорыв — непрерывно пополняемая структурированная совокупность электронных данных и документов об объектах и технологиях ПН, необходимая и достаточная на каждом этапе жизненного цикла (размещения, проектирования, сооружения, пуско-наладки, эксплуатации и вывода из эксплуатации).

ИМ может быть показана как в архитектурно-строительном, так и функционально-технологическом представлении, что обеспечивает оптимальную навигацию пользователям в зависимости от решаемых задач.

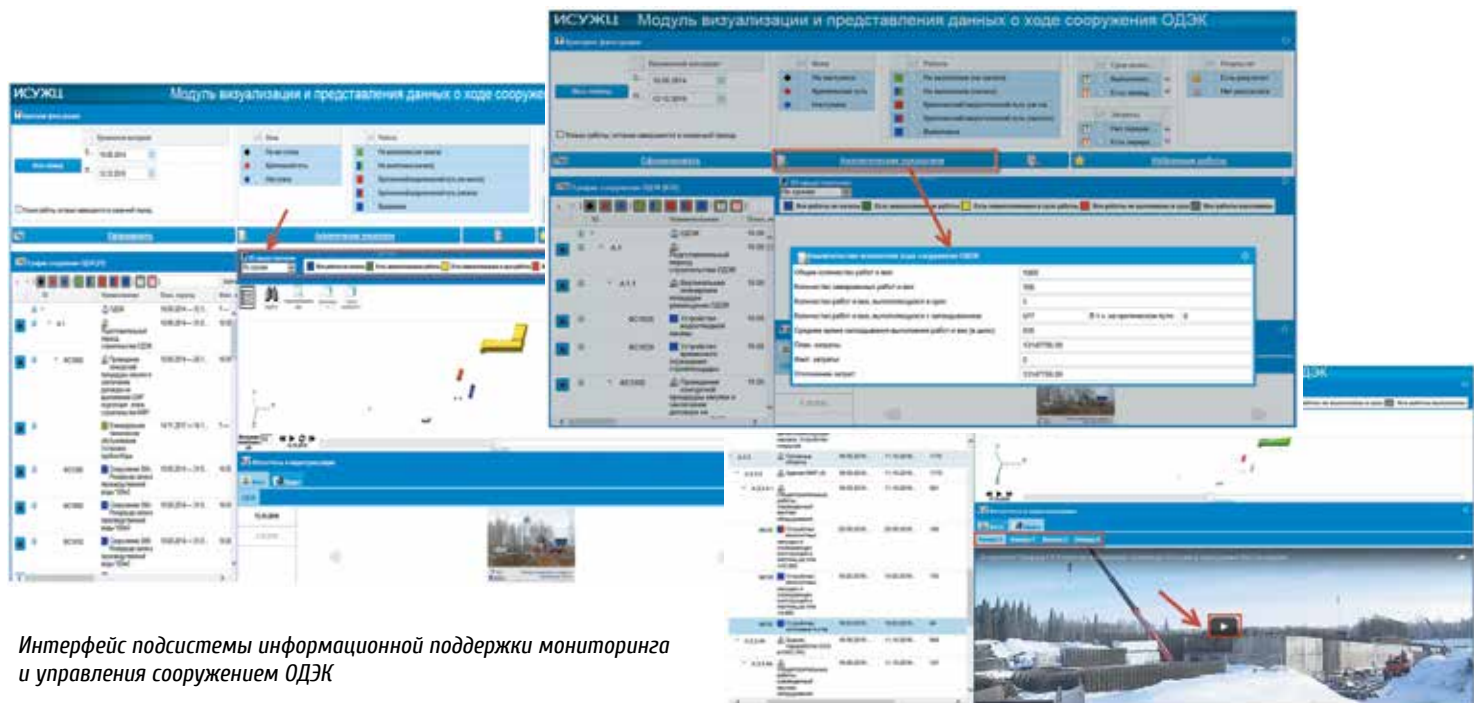
На рисунке на следующей странице представлен пример интерфейса одной из подсистем ИСУЖЦ — подсистемы информационной поддержки мониторинга и управления сооружением опытно-демонстрационного энергокомплекса (ОДЭК).

Эффекты от внедрения ИСУЖЦ

Применяемые решения по цифровизации позволили консолидировать управление и результаты разработок проектного направления «Прорыв» и обеспечить эффективное взаимодействие участников в условиях постоянной оптимизации



Наполнение ИСУЖЦ



Интерфейс подсистемы информационной поддержки мониторинга и управления сооружением ОДЭК

проектов с оперативным учетом результатов параллельно выполняемых НИОКР. Все работы ПН организованы в цифровом пространстве и позволяют использовать для анализа опережающее представление объектов в виртуальной среде.

Разработка технологий управления расчетными обоснованиями безопасности объектов ЯТЦ

Актуальность исследований

Для крупных научных, проектных и конструкторских организаций одной из важнейших составляющих научных исследований является проведение различных расчетов (часто с использованием суперкомпьютеров) и натурных экспериментов. С целью уменьшения расходов на проведение физических испытаний и создание соответствующих макетов, проектирование и конструирование современных технически сложных изделий и объектов в обязательном порядке сопровождается большим количеством компьютерных расчетов электронных моделей разных вариантов конструкции изделий и объектов. Важной является и возможность быстрого и качественного сопоставления между собой результатов расчетных и экспериментальных исследований, а также получение ответа на вопросы, позволяют ли выработанные в ходе исследований подходы и решения добиться требу-

емых характеристик изделия (качественных, стоимостных и временных), а также сохранения научных доказательств этих утверждений. Современная база для проведения расчетов и экспериментов позволяет увеличивать количество просчитываемых вариантов с учетом различных граничных условий, использовать мультифизические расчетные системы, переходить от эмпирических методов расчетов к расчетам из первых принципов. Все это приводит к лавинообразному увеличению объема различной информации: от исходных данных для расчетов до результатов их анализа. Кроме того, сам процесс проведения компьютерных расчетов состоит из значительного количества этапов, в которых могут быть задействованы разные подразделения предприятия и могут применяться различные расчетные системы и вычислительные ресурсы. Применение цифрового прототипа, в котором вся информация будет взаимосвязана, структурирована и полна, является серьезным и, по сути, единственным способом эффективной организации работ на этапе научных исследований.

Существующая на предприятиях в настоящее время технология проведения расчетов характеризуется следующими проблемами:

- Расчетные данные для разных вариантов просчитываемых конструкций (электронных моделей) изделий и объектов в большом количестве хранятся у каждого инженера-расчетчика на своем компьютере без какой-либо структуризации и резервного копирования, что приводит как к угрозе потери

- данных, так и к проблемам с поиском нужной информации.
- В случае применения в рамках расчетного обоснования разных расчетных систем (например, для моделирования разных показателей) инженер-расчетчик вынужден тратить время на изучение соответствующих методик работы (механизмов запуска, правил указания файлов для расчета и т.д.) с каждой расчетной системой. Аналогичная проблема связана с необходимостью изучения механизмов проведения расчетов на разных вычислительных ресурсах — персональных компьютерах для простых проверочных расчетов и супер-ЭВМ для ресурсоемких расчетов.
- Взаимодействие между разными сотрудниками и обмен данными на разных этапах расчетного обоснования происходит путем передачи данных «на флешке» или через электронную почту — это также приводит к многочисленным нестыковкам и несоответствию конечных результатов расчетов и исходных просчитываемых конструкций.

ИС «Системная оболочка»

Решение перечисленных проблем возможно за счет перехода к современной технологии управления процессами ин-

женерных расчетов и натурных экспериментов. Данная технология реализуется путем создания и внедрения соответствующей интегрированной информационной системы управления расчетными обоснованиями и натурными экспериментами и разработки необходимых регламентов. В рамках проекта «Коды нового поколения» проектного направления «Прорыв» ИБРАЭ РАН разработана такая информационная система (ИС), получившая название «Системная оболочка».

Основным назначением ИС «Системная оболочка» являются:

- автоматизация управления расчетными и экспериментальными данными (сбор, структурирование, классификация, централизованное и защищенное хранение, поиск, подготовка для визуализации и т.д.);
- унификация механизмов для проведения расчетов с использованием различных расчетных систем (в том числе собственной разработки) и вычислительных ресурсов;
- автоматизация и организация совместной работы всех участников (в том числе территориально удаленных друг от друга) процессов проведения расчетных обоснований и экспериментов.

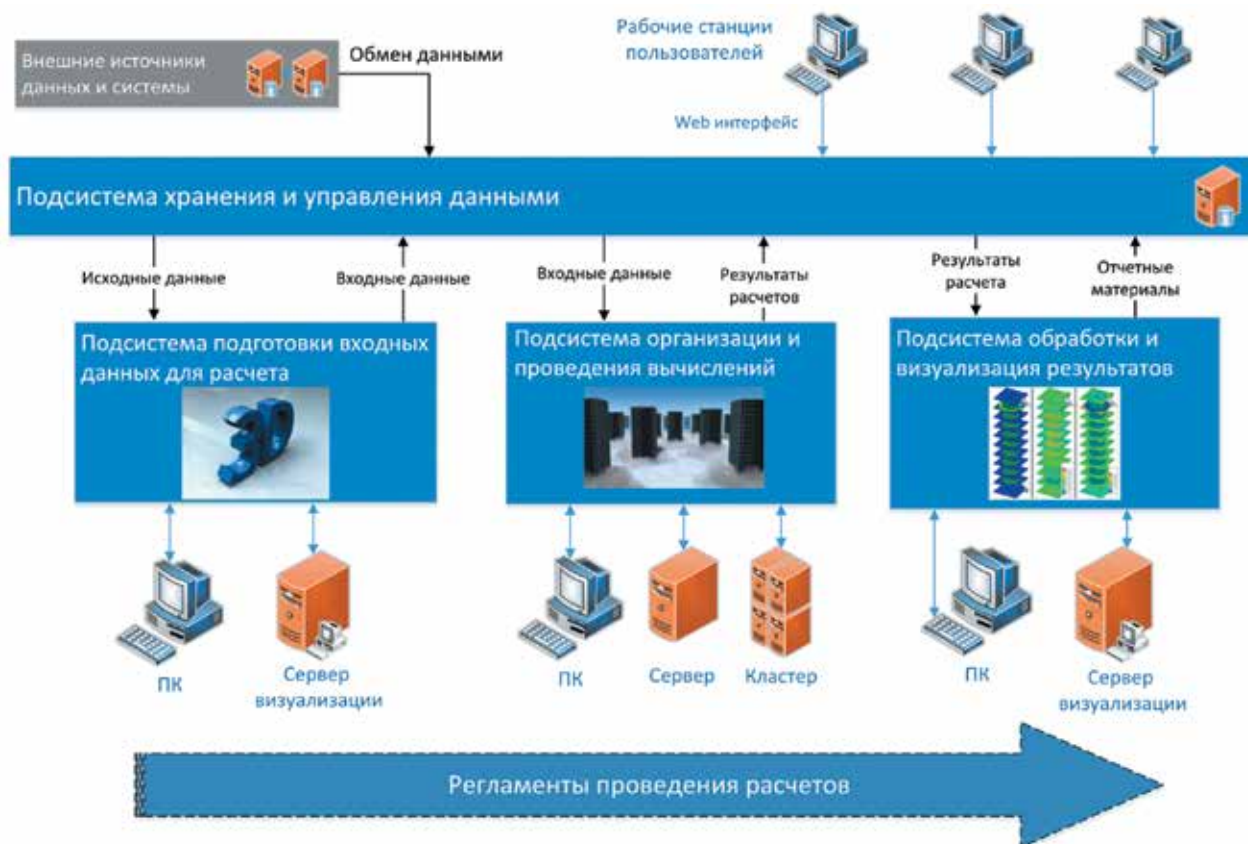


Схема проведения расчетов в рамках ИС «Системная оболочка»

Основные возможности системы:

- структурированное хранение информации о расчете — документации о планировании и проведении расчетных работ;
- структурированное хранение полученных расчетных данных с указанием использованной расчетной системы;
- описание расчетной системы и расчетных методик;
- результаты расчета;
- расчетные модели;
- оценки расчетных погрешностей целевых функционалов и измеряемых величин;
- хранение ссылочной связи между экспериментальными и расчетными данными;
- классификация информации о расчетах и экспериментальных работах с целью облегчения их повторного использования;
- поиск информации об экспериментальных работах и полученных расчетных данных.

ИС «Системная оболочка» предоставляет эффективные средства коллективной работы, выдачи заданий при планировании работы и контроля сроков их выполнения (с отправкой автоматических уведомлений на электронную почту), а также механизмов согласования полученных данных в электронном виде.

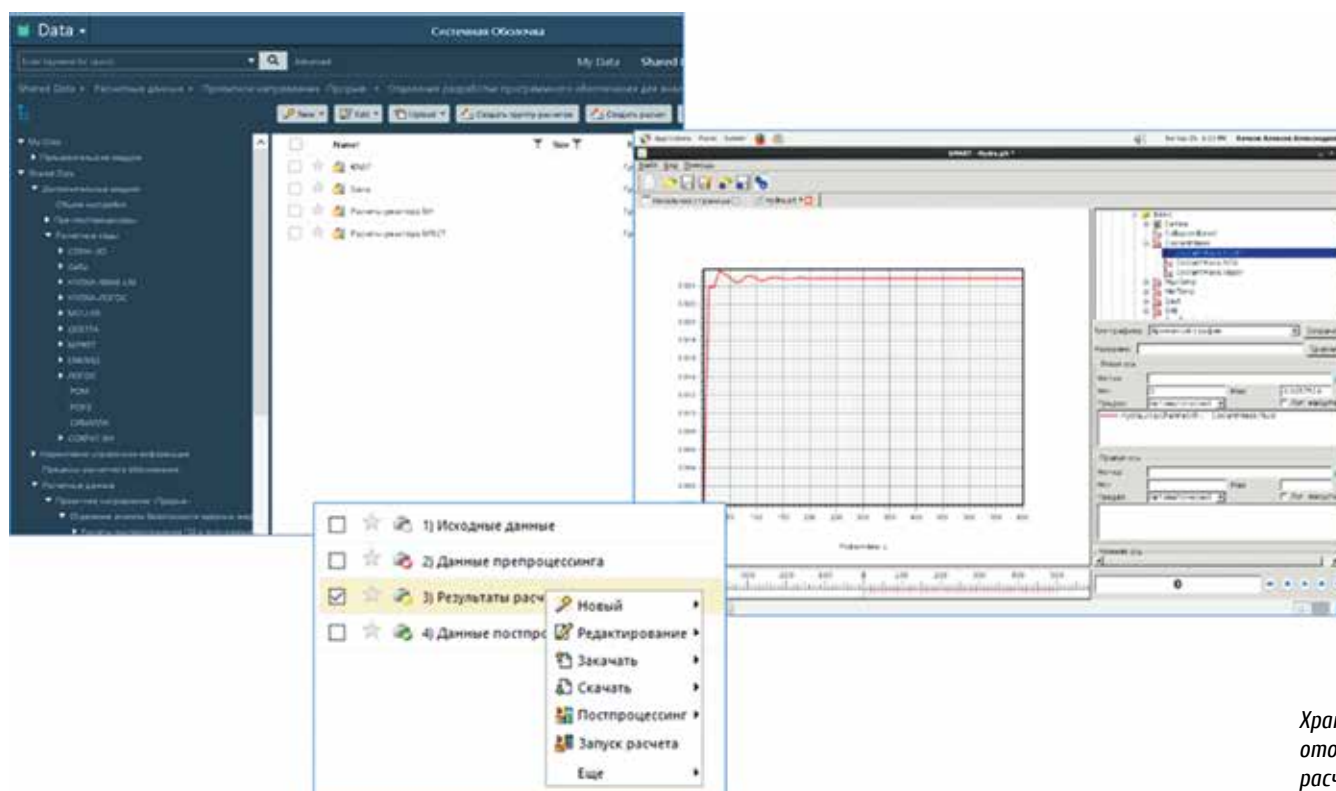
Ниже на рисунках представлены примеры интерфейса ИС «Системная оболочка».

Внедрение системы на предприятии должно обеспечить:

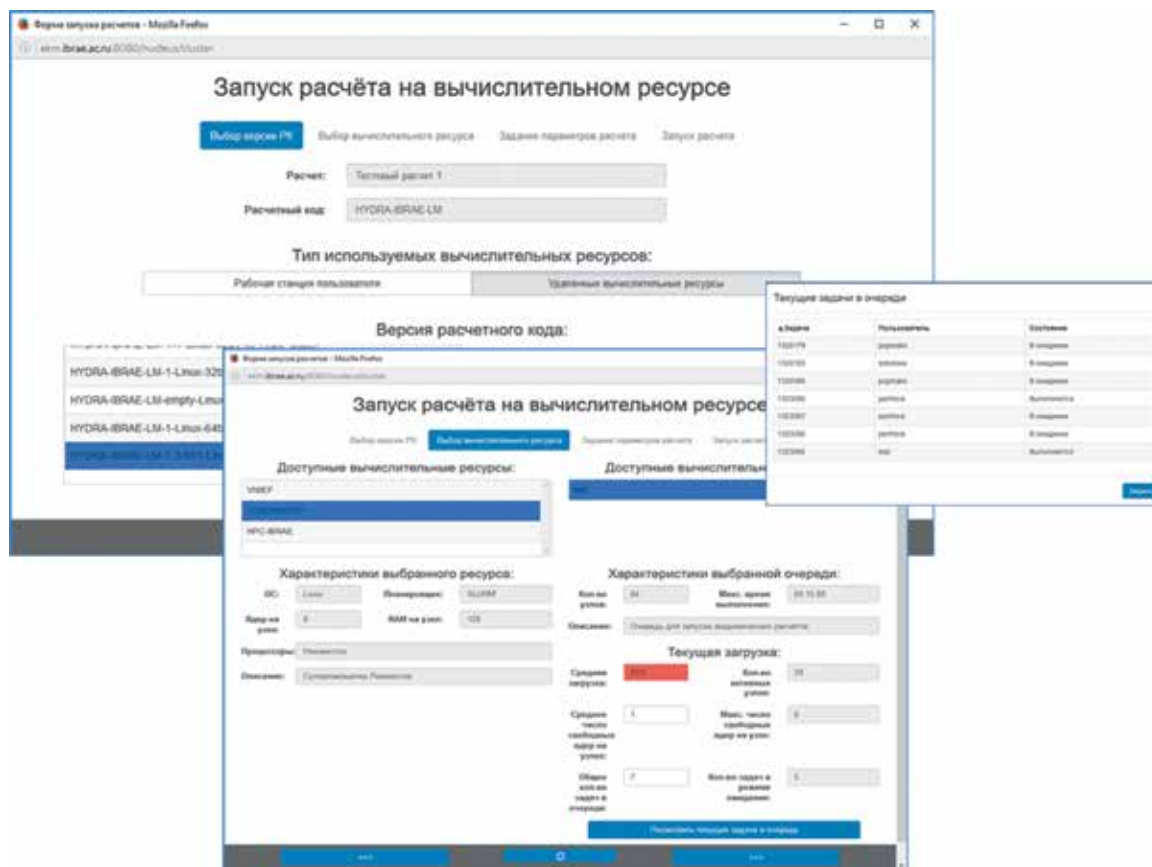
- повышение общего качества расчетных обоснований и сокращение времени на взаимодействие между различными подразделениями предприятия;
- сокращение трудозатрат на проведение расчетов и, соответственно, общее увеличение количества проводимых расчетов;
- обеспечение сохранения и контроля интеллектуальной собственности.

Указанные преимущества в итоге позволят:

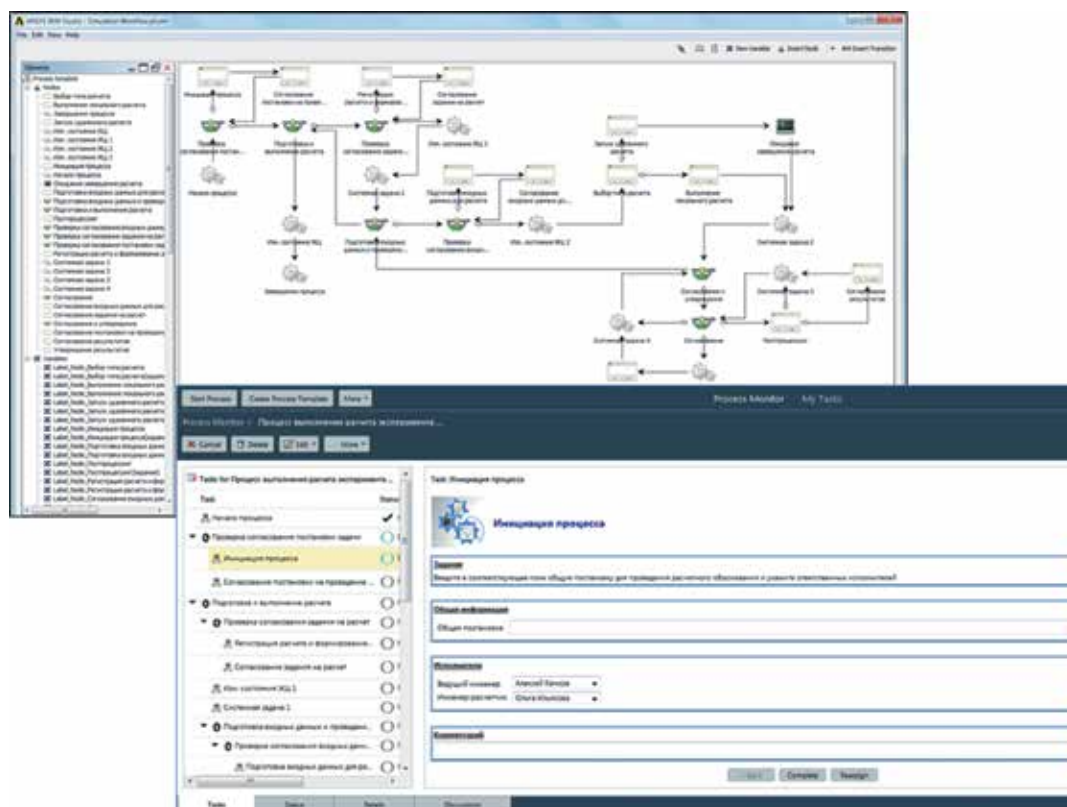
- снизить риск ошибок и повысить качество изделий и объектов за счет увеличения числа просчитываемых вариантов;
- ускорить вывод на рынок и сократить затраты на производство изделий и объектов благодаря уменьшению потребности в физических прототипах;
- повысить качество обоснования проектных решений за счет повышения качества экспериментальных данных.



Хранение и отображение расчетных данных



Запуск расчетов на различных вычислительных ресурсах



Управление процессами расчетных обоснований (workflow)

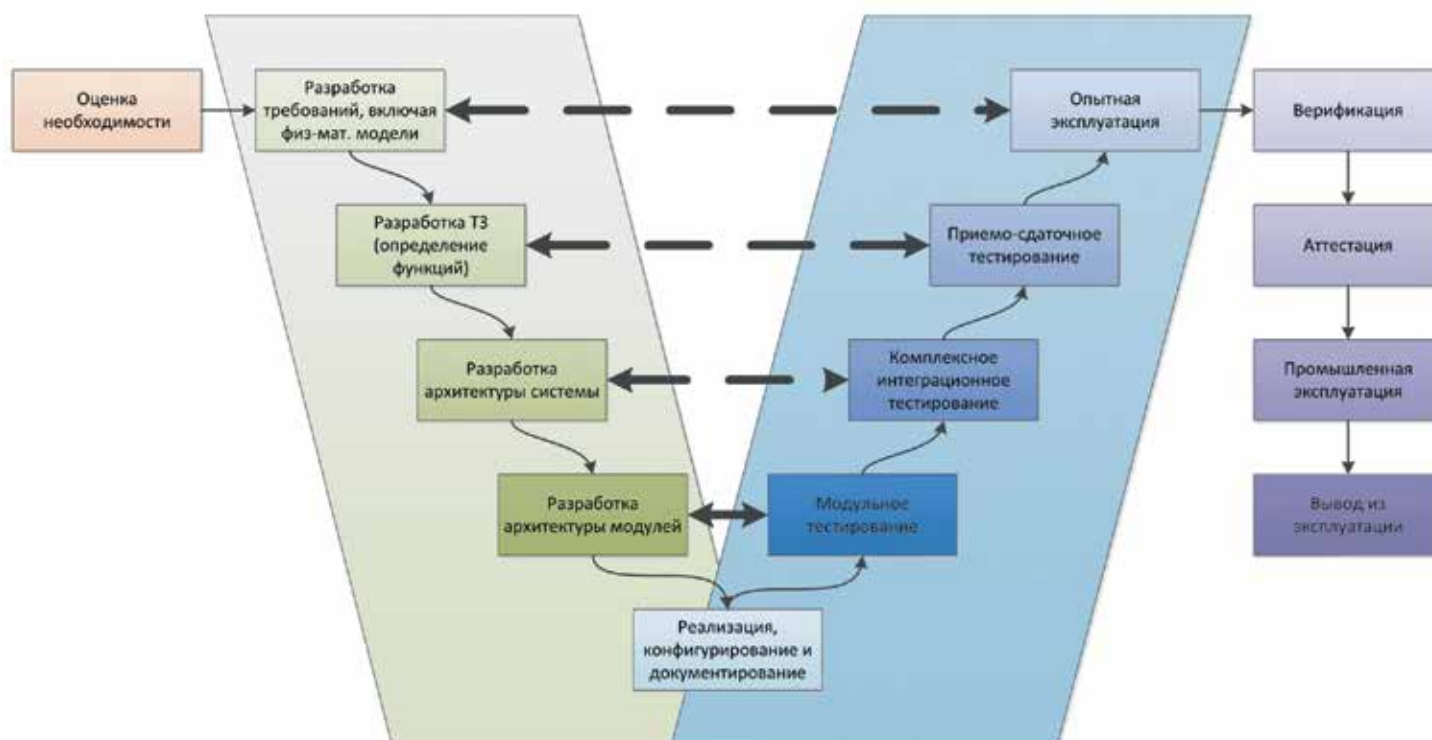
Адаптация и внедрение технологий управления жизненным циклом программных комплексов

Актуальность исследований

Программные комплексы являются такими же продуктами, как и машиностроительные изделия. При этом программное обеспечение может существовать как само по себе, так и являться частью еще более сложной мехатронной системы. Например, в таких современных изделиях, как автомобиль или самолет, одинаковую важность имеют механическая конструкция, электронные схемы и встроенное программное обеспечение, причем эти три компонента все более тесно интегрированы между собой. Более того, зачастую конечные потребительские характеристики изделий определяются в большей степени именно программным обеспечением, под управлением которого работают остальные системы. Это, а также увеличивающаяся сложность «обычных» программных комплексов (особенно, расчетных кодов), приводит к необходимости активно использовать подходы по управлению жизненным циклом и при разработке и поддержке программного обеспечения. Жизненный цикл ПО отличается некоторыми специализированными этапами, которые представлены ниже на рисунке.

Процессы ЖЦ РК могут быть сгруппированы по семи основным дисциплинам, каждая из которых определяет деятельность участников процесса в своей области, а в совокупности все дисциплины формируют единый подход по управлению процессами жизненного цикла ПО. Эти дисциплины включают в себя:

- управление требованиями — в части сбора и формализации требований, их согласования и утверждения, управления изменениями требований и отслеживания их выполнения;
- управление разработкой — в части непосредственной разработки, включая физико-математическое моделирование, проектирование, программирование и документирование;
- управление тестированием, верификацией и валидацией — в части подготовки и проведения тестирования, верификации и валидации, включая проверки соответствия разработанного ПО предъявляемым к нему требованиям, а также их применимости в реальных условиях эксплуатации;
- управление поставкой и сопровождением — в части поставки и сопровождения ПО, в том числе проведения опытной эксплуатации;
- управление проектом — в части планирования всех видов проектных работ и координации их выполнения соответствующими исполнителями;



Жизненный цикл расчетного кода

- управление конфигурациями — в части планирования, идентификации и контроля за состоянием конфигурации ПО, а также компоновки и выпуска релизов;
- управление изменениями — в части управления запросами на изменение (требований) и дефектами в процессе разработки.

Процессы управления требованиями, разработкой, тестированием, верификацией и валидацией, поставкой и сопровождением составляют четкую последовательность на протяжении всего ЖЦ ПО, а процессы управления проектом, изменениями и конфигурациями действуют на всех этапах и непрерывно сопровождают разработку.

Для поддержки управления ЖЦ ПО применяются специализированные информационные системы — ALM-системы (ALM — Application Lifecycle Management), которые автоматизируют процессы ЖЦ и позволяют организовать групповую работу над ПО. Важная организационная составляющая внедрения описываемого подхода — подготовка регламентов в соответствии с выделенными дисциплинами для обеспечения выполнения процессов управления ЖЦ ПО.

В результате внедрения представленного подхода и ALM-системы могут быть достигнуты следующие эффекты:

- оперативность и качество управления проектом (выполнение запланированной работы с учетом ограничений по срокам и бюджету, без снижения качества результата);
- высокий уровень качества разрабатываемого ПО;
- эффективность взаимодействия участников проекта;
- оперативность и качество поддержки пользователей.

Система управления разработкой расчетных кодов проектного направления «Прорыв»

В рамках частного проекта «Коды нового поколения» проектного направления «Прорыв» была разработана система управления процессами ЖЦ расчетного кода, получившая название СУРРК (Система управления разработкой расчетных кодов). Основой системы является одна из наиболее известных в мире ALM-платформ — программный пакет IBM Rational Jazz. Для внедрения системы был определен порядок работы участников процессов ЖЦ с учетом их роли в проекте, разработаны соответствующие схемы бизнес-процессов и регламентирующие документы.

Назначение СУРРК. Реализация централизованного хранения результатов проектной деятельности по разработке, тестированию и верификации расчетных кодов.

Планирование, контроль и управление работами коллективов разработчиков. Информационная поддержка пользователей кодов и обеспечение обратной связи между пользователями и разработчиками кодов.

Функционал СУРРК. Основными функциями СУРРК являются:

- единое хранение проектных артефактов с поддержкой версионного контроля;
- управление процессами планирования ресурсов, работ и задач;
- контроль ресурсов, выполнения проектных работ и задач;
- управление требованиями;
- управление исходными текстами программ и сборкой исполняемых модулей;
- управление тестовыми испытаниями, сбор и хранение информации об их результатах и найденных ошибках;
- управление конфигурацией создаваемого продукта с возможностью контроля конфигурационных изменений на всех этапах жизненного цикла;
- управление изменениями на основе заявок и процессов их согласования;
- контроль за соблюдением стандартов оформления документов и исходных текстов программ;
- авторизованный доступ пользователей к проектным артефактам.

Управление требованиями. В рамках процесса управления требованиями первым этапом в СУРРК импортируется техническое задание на расчетный код. После этого из технического задания в полуавтоматическом режиме «извлекаются» требования и представляются в системе в виде самостоятельных объектов. Далее требования группируются в наборы для планирования выпуска релизов кода. Наконец, по окончании разработки релиза требования трассируются с результатами работ.

Планирование работ. Средствами СУРРК осуществляется планирование работ по разработке РК и проведению их верификации и аттестации.

Взаимосвязь данных. Данные в СУРРК хранятся в тесной взаимосвязи друг с другом, что позволяет отследить выполнение

требования к расчетному коду, а также получить подтверждение выполнению требования:

- требование трассируется с запросом на изменение (ЗНИ);
- ЗНИ трассируются с задачами, назначенными на конкретных исполнителей;
- задачи трассируются с наборами изменений, доставленными в версию хранилище.

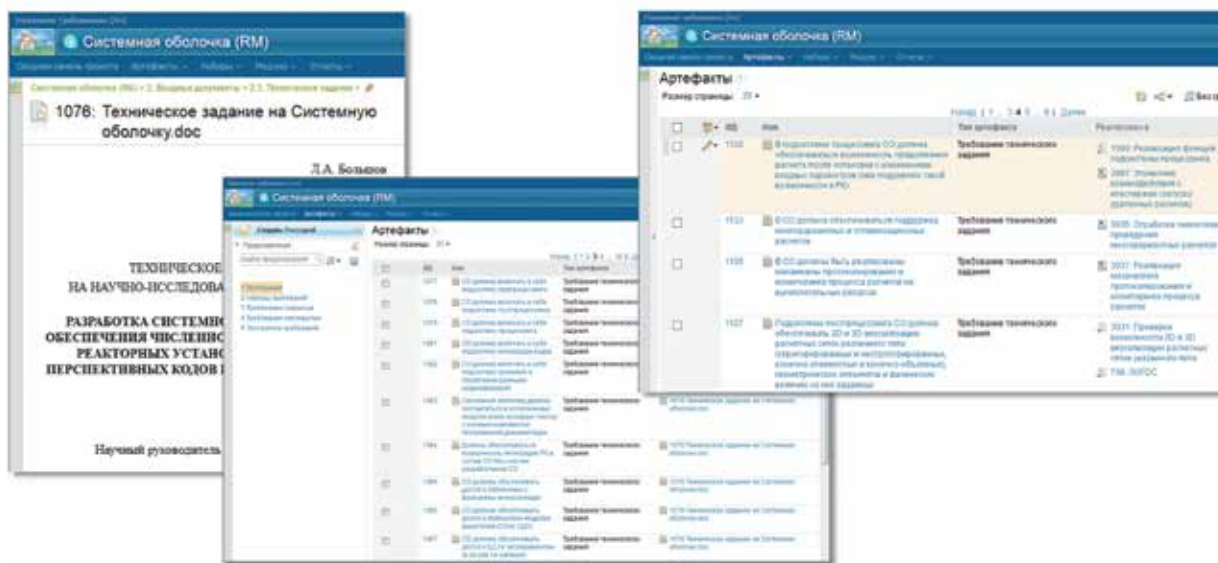
Сопровождение эксплуатации кодов. СУРРК также предоставляет сервис для технической поддержки расчетных кодов, обеспечивая обратную связь между разработчиками и пользователями кодов. В рамках сервиса «Техподдержка РК»:

- пользователи кодов регистрируют заявки, где указывают на обнаруженные в ходе эксплуатации кода замечания, формируют свои пожелания или задают вопросы разработчикам кода;

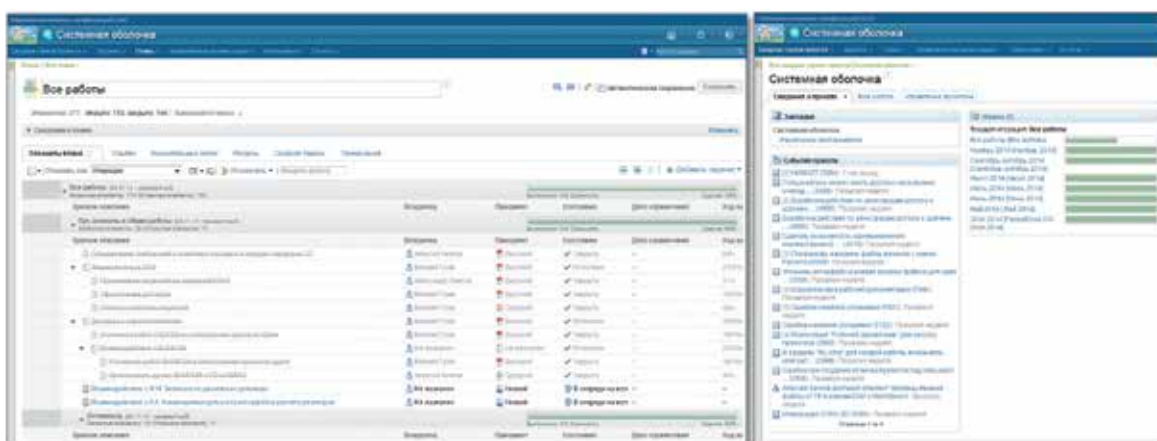
мулируют свои пожелания или задают вопросы разработчикам кода;

- разработчики кода выполняют обработку зарегистрированных заявок и в случае необходимости выполняют доработку кода и информируют об изменениях пользователей.

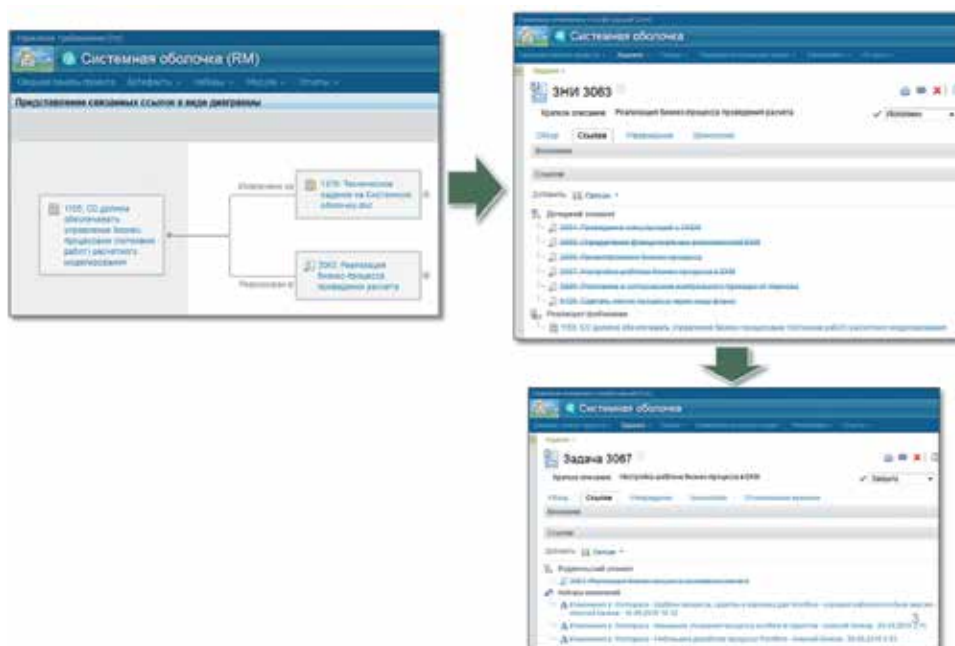
Передача релизов расчетных кодов пользователям осуществляется следующим образом: релизы загружаются в проектную область «Техподдержка РК», далее публикуются уведомления о выпуске релизов, содержащие ссылки на дистрибутивы и документацию к кодам; после чего осуществляется рассылка сообщений о выпуске релизов на адреса электронной почты пользователей кодов.



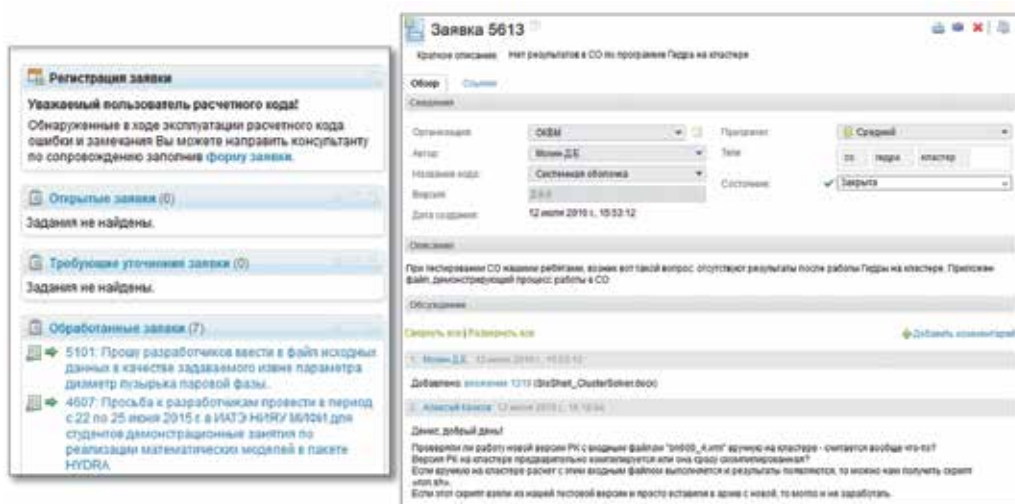
Управление требованиями в СУРРК



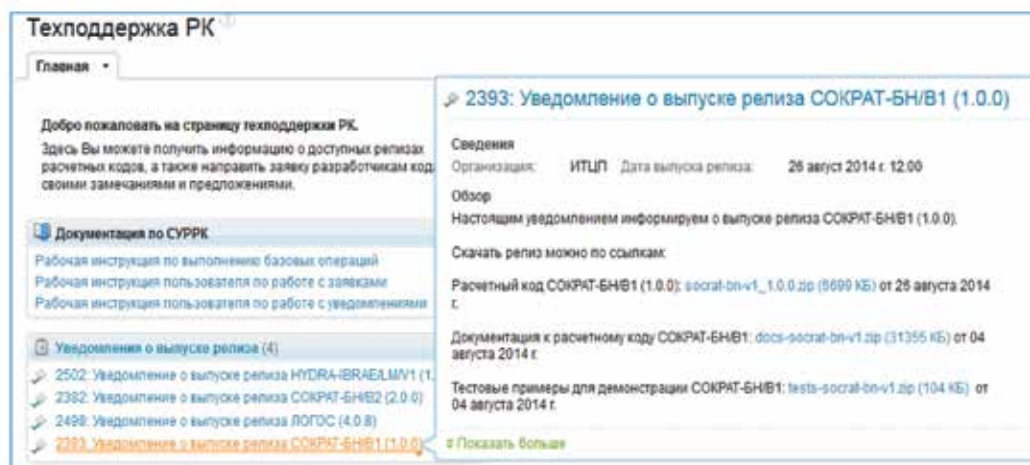
Планирование работ в СУРРК



Взаимосвязь данных в СУРРК



Работа с заявками пользователей кодов в СУРРК



Уведомления о выпуске релизов СУРРК

Разработка информационных порталов для сопровождения комплексных проектов и программ

Назначение

Информационные порталы в современной организации представляют собой эффективное средство для структуризации и систематизации данных (документации) и управления коллективной работой сотрудников. ИБРАЭ РАН также использует в своей повседневной деятельности порталы для сопровождения комплексных проектов и программ. Основными задачами этих порталов являются централизованное хранение и обработка важной информации, доступ сотрудников к необходимым данным, файловым архивам и приложениям, а также повышение уровня коммуникаций как внутри коллектива, так и с внешними организациями (потребителями, контрагентами).

Информационные порталы ИБРАЭ РАН базируются на различных порталных технологиях от ведущих мировых и отечественных производителей, таких как Microsoft (SharePoint) и Oracle (APEX), и обеспечивают доступ к данным как с персонального компьютера, так и с мобильных устройств. Силами Отдела ведется постоянная работа по улучшению и расширению имеющейся функциональности порталов под нужды других отделов и проектных групп внутри Института.

Кроме того, Институт активно применяет и передает свой опыт разработки информационных порталов в проектах, в которых принимает участие. В частности, в проектом направлении «Прорыв» ИБРАЭ РАН не только разработал и поддерживает информационный портал центра ответственности (ЦО) «Коды нового поколения» (СУРРК-Портал), но и участвует в разработке и внедрении отдельных функций информационного портала единого информационного пространства (ЕИП) всего проектного направления.

Возможности информационных порталов ИБРАЭ РАН

Наиболее востребованные возможности, предоставляемые пользователям информационными порталами ИБРАЭ РАН, представлены на рисунке справа.

Файловое хранилище с контролем версий. Предназначено для централизованного хранения информации по проектам (отчетности и прочей электронной документации; РИД — результатов интеллектуальной деятельности; файлов мультимедиа) с разграничением доступа сотрудников к ней, поддержкой отслеживания изменений и применением технологий расширенного поиска. Хранилище предоставляет сотрудникам возможность совместной работы с документами, необходимыми для выполнения их служебных обязанностей.



Доступ к portalу с различных устройств



Возможности информационных порталов ИБРАЭ РАН

Организация делопроизводства. Порталы автоматизируют деятельность по регистрации, оформлению и учету входящей и исходящей корреспонденции, документации юридического характера (договоров, контрактов, соглашений), финансовой документации (счетов, смет), организационно-распорядительной и административной документации (приказы, распоряжения) и т.п.

Электронный документооборот. Информационные порталы ИБРАЭ РАН реализуют процессы прохождения документов в организации и предоставляют решения для автоматизации деятельности по сбору отзывов, согласованию и утверждению электронной документации, обеспечивая эффективное управление на протяжении всего ее жизненного цикла.

Управление задачами и поручениями. Порталы автоматизируют процессы постановки и контроля выполнения задач и реализуют функции по инициированию задач, назначению исполнителей и сроков, отслеживанию состояния задач, автоматическому информированию ответственных за выполнение решений и формированию отчетности.

Принятие решений. Портал предоставляет руководителю единую точку входа для рассмотрения и принятия взвешенных управленческих решений на основе просмотра списка всех задач, определения ключевых показателей эффективности (KPI), формирования карточек показателей эффективности и использования широкого спектра сопутствующих аналитических отчетов, представляющих необходимую информацию в удобной форме в виде сводных таблиц и графиков.

Организация коммуникаций. В ИБРАЭ РАН портал дополнен средствами «виртуального офиса» (интерактивными досками, средствами видеоконференцсвязи Polycom, средствами 3D-визуализации и 3D-окружения, средствами виртуальной реальности), обеспечивающими проведение рабочих встреч на самом высоком уровне, как непосредственно на территории предприятия, так и в удаленном режиме.

Управление знаниями. В рамках портала организована база знаний ИБРАЭ РАН, в которой в процессе работы накапливается и обрабатывается информация, в том числе публикации и презентации сотрудников.

Автоматизация подготовки управленческой отчетности.

Порталы позволяют единожды настроить и впоследствии автоматически готовить отчетность в различных форматах — графики, HTML, Excel и др.

Оболочка для поддерживаемых баз данных. Поддерживается ввод и вывод данных через браузер, рассылка напоминаний по наступлению событий (вышел срок, не введены нужные данные в БД, и прочие). Сама БД инкапсулируется, недоступна для конечного пользователя, что существенно повышает безопасность хранения.

Эффекты от внедрения

Внедрение информационных порталов позволило Институту:

- консолидировать информацию в едином информационном пространстве с разграничением прав доступа;
- сократить время на поиск необходимой информации;
- повысить эффективность процессов предприятия;
- ускорить коллективную работу над документами и сократить сроки выполнения работ по проектам;
- повысить исполнительскую дисциплину, производительность труда сотрудников.

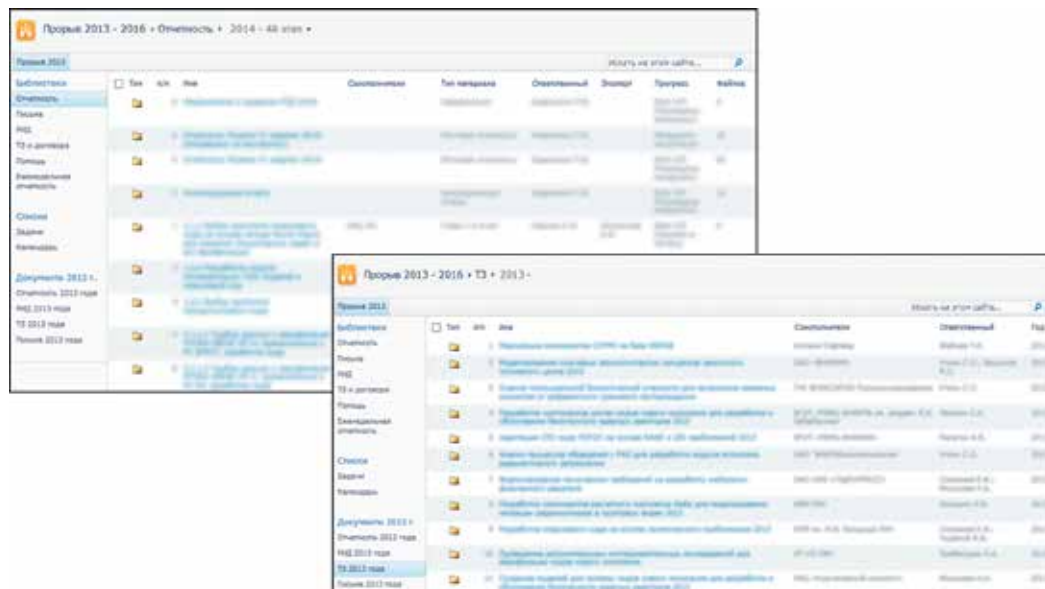
Примеры внедрения

Ниже представлены примеры отдельных технических решений, внедренных ИБРАЭ РАН.

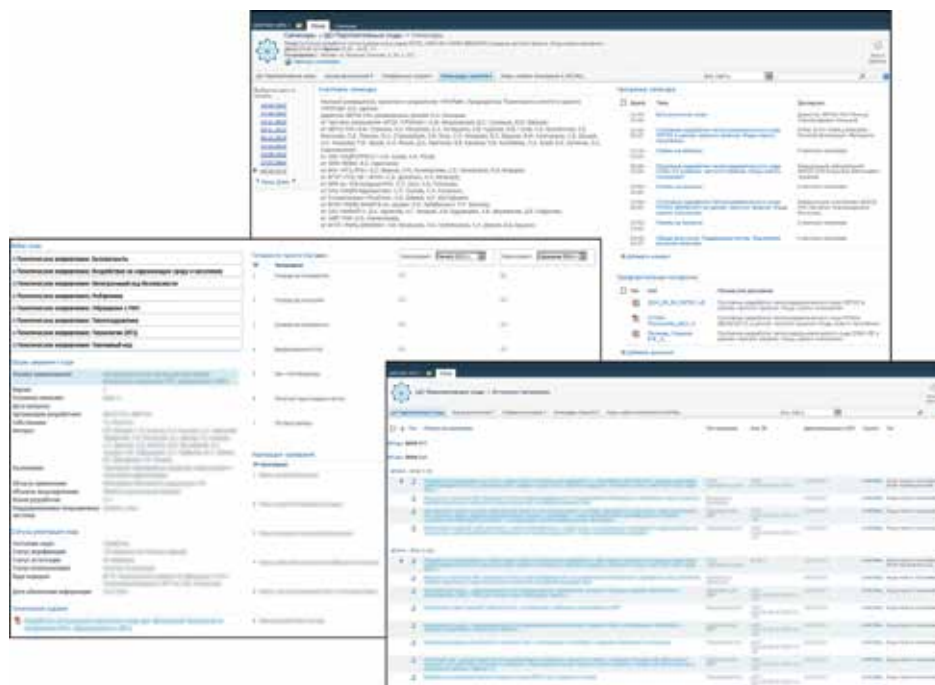
Информационный портал ИБРАЭ РАН на базе Microsoft SharePoint содержит сайты для рабочих групп по проектам «Прорыв», «Водородная безопасность», «Виртуальная АЭС» и другие. Портал предназначен для хранения и совместной работы сотрудников Института с документами по проектам, проведения внутренней экспертизы отчетных материалов, в том числе РИД, а также контроля исполнения задач и поручений по проектам.

Информационный портал частного проекта «Коды нового поколения» (СУРРК-Портал) на базе Microsoft SharePoint является структурным компонентом информационного портала ЕИП проектного направления «Прорыв» и предназначен для информационной поддержки работ в рамках частного проекта «Коды нового поколения». Портал обеспечивает информирование участников о текущем состоянии реализации кодов и степени удовлетворения кодов предъявляемым требованиям, предоставление общего доступа к документам и конечным результатам, сопровождение проводимых мероприятий (семинаров, различных совещаний, конференций и т.д.).

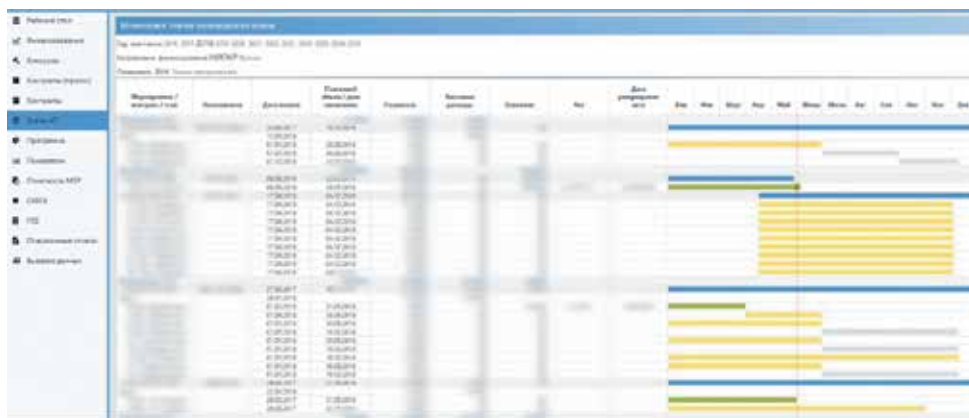
Информационный портал на основе OracleApEx для поддержки работы с базами данных, разрабатываемыми в рамках исполнения ФЦП «ЯРБ». Реализован удобный интерфейс ввода и вывода данных через браузер, рассылка напоминаний по наступлению событий и визуализация данных в табличном и графическом видах. На основе введенной в БД информации портал позволяет автоматизировать получение различной управленческой отчетности.



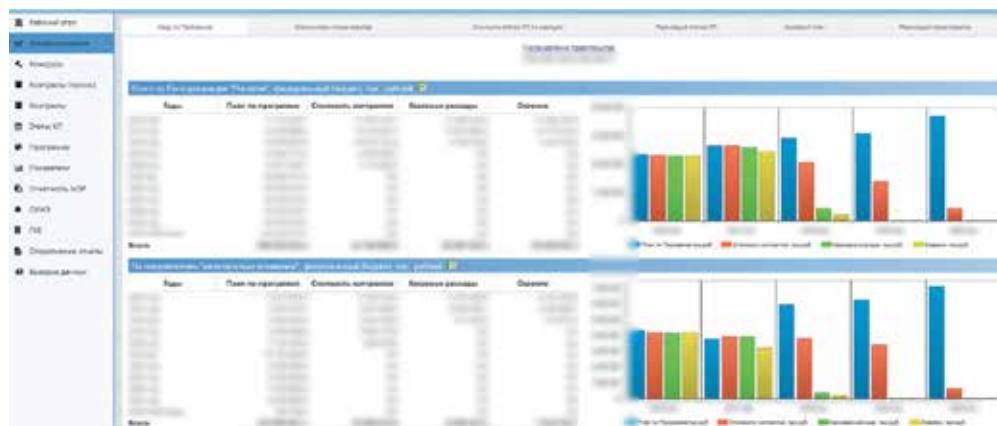
Области коллективной работы над документами на примере портала ИБРАЭ РАН



Хранение документов, мероприятий и представление хранимой информации в виде настраиваемых страниц на примере СУРРК-Портал

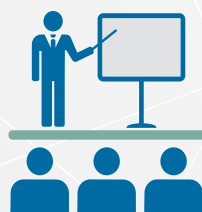


Вывод данных инкапсулированной БД в виде диаграммы Ганта

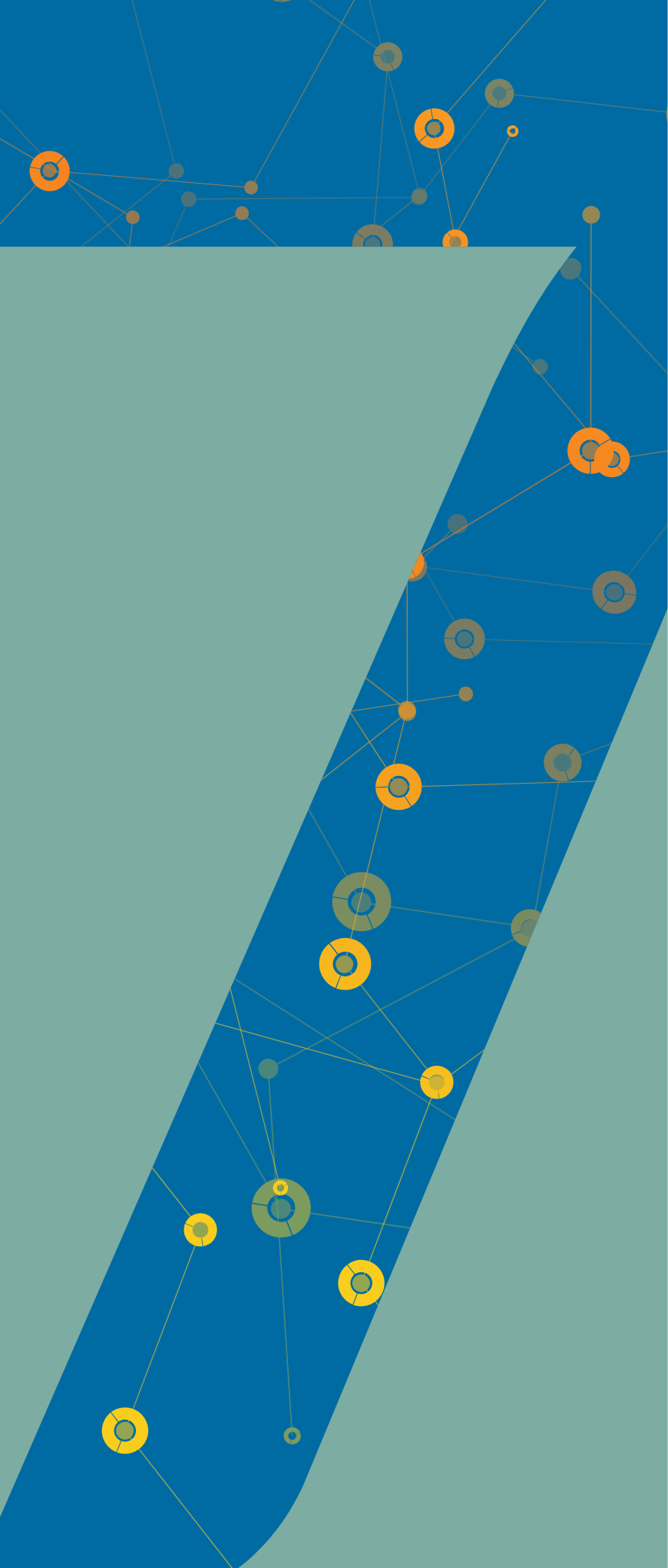


Вывод данных в табличном и графическом виде

Научно-организационные направления деятельности ИБРАЭ РАН



Руководство ИБРАЭ РАН придает большое значение практической работе по развитию и поддержке ряда организационных направлений деятельности, которые обеспечивают в конечном итоге успешное решение научных задач, стоящих перед Институтом.



К этим направлениям относятся:

- научно-образовательная деятельность, которая включает в себя организацию работы Диссертационного совета и аспирантуры, подготовку специалистов на действующей в ИБРАЭ РАН кафедре проблем безопасного развития современных энергетических технологий Московского физико-технического института;
- воспитание научных кадров во взаимодействии с Советом молодых ученых ИБРАЭ РАН;
- научно-издательская деятельность, направленная на публикацию научных трудов сотрудников Института на высоком полиграфическом уровне, развитие и продвижение онлайн-ресурсов ИБРАЭ РАН, подготовка и издание научного и информационно-аналитического журнала «Арктика: экология и экономика» и научно-технического журнала «Радиоактивные отходы», учредителем которых является ИБРАЭ РАН;
- реализация современных механизмов внутри и межотраслевой кооперации с целью решения актуальных задач инновационного экономического развития России в рамках организации Технологических платформ.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПЛАТФОРМА «КОМПЛЕКСНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ПРОМЫШЛЕННОСТИ И ЭНЕРГЕТИКИ»



Пономарев Владимир Николаевич

д.ф.-м.н., заместитель директора
по стратегическому развитию и инновациям
ИБРАЭ РАН, Председатель
Правления ТП КБПЭ

«Ключевое значение для успешного решения стратегических проблем, стоящих перед Россией в XXI веке, имеет преодоление технологического отставания от мирового уровня в сфере промышленного производства, и необходимым шагом в данном направлении станет переход российской экономики на инновационный путь развития. Важнейшей предпосылкой такого перехода является создание эффективных инструментов трансформации инновационных научных идей в рыночно востребованные передовые технологии, новые виды продуктов, товаров и услуг. В соответствии с общемировой тенденцией подобные задачи решаются, в том числе, в рамках так называемых технологических платформ».

Технологические платформы (ТП) представляют собой структуры, обеспечивающие координацию усилий организаций-участников ТП по созданию перспективных коммерческих технологий, по привлечению ресурсов для проведения научно-исследовательских работ на основе механизмов государственно-частного партнерства, по совершенствованию нормативно-правовой базы в области инновационного развития. Начиная с 2011 г. в Российской Федерации сформированы 37 ТП, действующих в наиболее приоритетных сферах экономики.

Важнейшим итогом деятельности ТП КБПЭ является формирование и совершенствование условий, обеспечивающих активизацию процессов трансформации инновационных научных идей в востребованные рынком продукты, появляющиеся как результат удовлетворения потребностей производства и общества.

Технологическая платформа «Комплексная безопасность промышленности и энергетики» (ТП КБПЭ) была создана по инициативе ИБРАЭ РАН и НИЦ «Курчатовский институт» и утверждена решением президиума Совета при Президенте Российской Федерации по модернизации экономики и инновационному развитию России от 31.07.2013 г.

Эта инициатива стала ответом на Поручение Владимира Владимировича Путина (протокол заседания Совета генеральных и главных конструкторов при Председателе Правительства Российской Федерации от 07.12.2009 г. № 4, п. 7). В нем Президент России (в то время Председатель Правительства), позитивно оценивая опыт ведущих организаций, работающих над созданием систем безопасности в атомной отрасли, поручил учесть этот опыт при разработке мер по обеспечению надежности и безопасности в промышленности и энергетике.

Организацией — координатором ТП КБПЭ определен
Институт проблем безопасного развития атомной
энергетики Российской академии наук.



Сфера деятельности и организационная структура

ТП КБПЭ представляет собой самоуправляемое сообщество, ставящее целью координацию и концентрацию исследований и разработок, производственно-технологических, финансовых, административных и образовательных ресурсов, направленных на:

- создание перспективных технологий, новых продуктов и услуг, обеспечивающих повышение комплексной безопасности промышленности и энергетики, в том числе, и за счет прогнозирования и предупреждения аварийных и чрезвычайных ситуаций на основе анализа и управления рисками;
- совершенствование нормативной правовой и нормативной технической баз в области комплексной безопасности промышленности и энергетики, строительства и производства строительных материалов и изделий.

Научными руководителями ТП КБПЭ являются президент НИЦ «Курчатовский институт» чл.-кор. РАН **М.В. Ковальчук** и научный руководитель ИБРАЭ РАН акад. РАН **Л. А. Большов**.

Сопредседателями Совета ТП КБПЭ утверждены:

- Президент НИЦ «Курчатовский институт» член-корреспондент РАН **М. В. Ковальчук**,
- Научный руководитель ИБРАЭ РАН акад. РАН **Л. А. Большов**,
- Ректор МГТУ им. Н. Э. Баумана проф., д.т.н. **А. А. Александров**.

Председатель экспертного Совета — советник генерального директора ГК «Росатом», д.т.н., проф. **В. Г. Асмолов**.

*Съезд Технологической платформы
«Комплексная безопасность
промышленности и энергетики», 2016 г.*



*Диплом за активное участие в работе
XXI Международного форума «Технологии
безопасности 2016»*

Председатель Правления — зам. директора ИБРАЭ РАН, действительный государственный советник Российской Федерации, профессор, д.ф.-м.н. **В. Н. Пономарев**.

Совет ТП КБПЭ определяет стратегию ее развития на принципах Государственно-частного партнерства (ГЧП), обеспечивает координацию действий с органами власти, государственными корпорациями, ведущими российскими компаниями, отраслевыми и академическими научно-исследовательскими институтами, университетами, разработчиками, проектантами, конструкторскими бюро, производственными и сервисными компаниями, общественными организациями и объединениями, бизнес-ассоциациями, финансовыми институтами и т.д.

В состав Совета ТП КБПЭ входят представители федеральных министерств и ведомств (Минэнерго России, Минприроды России, МЧС России, Ростехнадзор, Минстрой России и Минпромторг России), Федерального Собрания Российской Федерации, крупных российских корпораций и компаний и представители бизнес-сообщества.

В соответствии с рекомендациями Минэкономразвития России, учитывая достигнутые результаты и завершение этапа становления ТП КБПЭ, по решению Общего собрания участников ТП КБПЭ в январе 2017 года была создана управляющая компания ТП КБПЭ — некоммерческая организация Ассоциация «Национальный Инновационный Центр «Комплексная Безопасность».

Сегодня участниками ТП КБПЭ являются 141 организация.

Деятельность платформы охватывает широкий спектр направлений: от ядерной и радиационной безопасности, пожарной и экологической безопасности, неразрушающего контроля и технической диагностики оборудования и объектов до комплексных систем мониторинга и управления безопасностью сложных технических объектов и систем, от комплексной безопасности зданий и сооружений до мониторинга прогнозирования и моделирования природных явлений, их вероятных последствий и обеспечения безопасности жизнедеятельности в целом, а также информационные технологии, телекоммуникация и связь, надежность систем энергетики и энергетическая безопасность, безопасность на транспорте, страховые инструменты, финансовые риски, социально-экономические, нормативные правовые и нормативно-технические аспекты комплексной безопасности промышленности и энергетики и другие.

По результатам оценки деятельности технологических платформ, проводимой последние два года Министерством экономического развития Российской Федерации, ТП КБПЭ входит в первую десятку из 37 утвержденных технологических платформ.

В числе приоритетов находятся проекты, связанные с повышением безопасности жизнедеятельности, включая объекты социальной и инженерной инфраструктуры, и устойчивого развития территорий, а также активное участие в реализации программы «Цифровая экономика Российской Федерации», утвержденной Распоряжением Правительства Российской Федерации от 28 июля 2017 года №1632-р. Программа направлена на создание необходимых условий для развития в России цифровой экономики, в которой данные в цифровом виде являются ключевым фактором повышения эффективности производства во всех сферах социально-экономической деятельности.

В рамках развития коммуникации в научно-технической и инновационной сферах подписаны соглашения об организации взаимодействия с рядом ведущих технологических платформ.

ТП КБПЭ осуществляет тесное взаимодействие и сотрудничество с министерствами, ведомствами и институтами развития. В частности, подписаны соглашения о сотрудничестве с Ростехнадзором, государственным бюджетным учреждением «Российское энергетическое агентство» Министерства энергетики Российской Федерации, ОАО «Федеральный центр проектного финансирования» (100% дочернее общество Государственной корпорации «Банк развития и внешнеэкономической деятельности») (Внешэкономбанк)).

В целях разработки и внедрения инновационных технологий двойного назначения в 2017 году было подписано Соглашение о сотрудничестве с главным управлением научно-исследовательской деятельности и технологического сопровождения передовых технологий (инновационных исследований) Министерства обороны Российской Федерации.

С момента утверждения ТП КБПЭ оказывает поддержку своим участникам, принявшим решение об участии в конкурсном отборе на предоставление субсидий в целях реализации федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы», проводимом



*Знакомство с экспозицией
Технологической платформы министра
МЧС России Пучкова В. А. и заместителя
министра внутренних дел России
Герасимова С. А. в ходе официального
открытия VII Международного Салона
«Комплексная безопасность-2014»*

Министерством образования и науки Российской Федерации. Всего было рассмотрено и поддержано 76 проектов, 12 из которых выиграли конкурсный отбор. Общий объем их финансирования более 1200 млн рублей, из которых сумма порядка 600 млн рублей – привлеченные внебюджетные средства.

Стратегические цели

Результатом и итогом деятельности в рамках ТП КБПЭ должно стать создание ряда ключевых продуктов в сфере обеспечения безопасности промышленности и энергетики. К ним относятся:

- **Технологические базы**, в том числе:
 - Технологии и системы интеллектуальной технической диагностики и неразрушающего контроля промышленного и энергетического оборудования, объектов строительства, систем тепло- и электроснабжения без вывода их из эксплуатации;
 - Инновационные методики диагностирования внутренней структуры материалов с компьютерной визуализацией результатов и вычислительным восстановлением трехмерной внутренней структуры объекта, основанные на разработке новых физических принципов взаимодействия различных энергетических полей;
- **Технологии и системы управления комплексной безопасностью**, в том числе технологии:

*Первый Всероссийский съезд
Технологической Платформы «Комплексная
безопасность промышленности и
энергетики» в рамках Международного
салона «Комплексная Безопасность – 2014»*





Дипломы за активное участие в работе Международных салонов «Комплексная безопасность», 2014–2016 гг.



Стеньшинский Сергей Борисович

первый заместитель Председателя
Правления ТП КБПЭ,
руководитель группы проектов и программ
комплексной безопасности промышленности
и энергетики ИБРАЗ РАН



Рыльский Н. А., д.ф.-м.н. Пономарев В. Н., академик РАН Большов Л. А., Зорин Д. Е.,
д.т.н. Штромбах Я. И. на VII Международном салоне «Комплексная безопасность»

- мониторинга состояния и уровня безопасности сложных технических систем;
- технической и расчетно-аналитической поддержки управления и принятия решений в реальном или квазиреальном масштабах времени, а также предупреждения аварийных и чрезвычайных ситуаций;
- численного моделирования сложных технических систем и оценки социально-экономических последствий аварий на объектах промышленности и энергетики;
- контроля и противоаварийного управления на всех этапах жизненного цикла объектов промышленности и энергетики в реальном масштабе времени;
- анализа и управления рисками.
- **Нормативные правовые акты**, регламентирующие техническое регулирование и меры по ликвидации аварийных ситуаций.
- **Методики оценки состояния безопасности** промышленных объектов и объектов энергетики и рекомендации владельцам, страховым компаниям и государству по ее повышению (кросс-отраслевой технологический консалтинг).
- **Образовательные программы.**

Ключевые направления деятельности Технологической платформы

- Создание базовых моделей анализа и обоснования безопасности конкретных технологий или проектов на основе опыта атомной энергетики по заказу компаний.
- Развитие и совершенствование общих методов вероятностного и детерминистского анализа безопасности различных технологий. Оценка и управление рисками в промышленности и энергетике.
- Развитие методов анализа и обоснования экологической безопасности, включая экологическую безопасность арктических регионов, обращение и утилизацию (переработку) отходов.

- Развитие методов комплексного мониторинга безопасности различных неатомных технологий с применением новейшего диагностического оборудования.
- Выработка рекомендаций по построению комплексных систем мониторинга и управления безопасностью сложных технических объектов.
- Совершенствование методов взаимодействия с населением при тяжелых авариях на промышленных и энергетических объектах.
- Применение технологий управления жизненным циклом наукоемких изделий и промышленных объектов (по отраслям промышленности).
- Развитие механизмов государственно-частного партнерства при решении задач комплексной безопасности промышленности и энергетики.

Конкурентные преимущества

- Высокий экспертный потенциал.
- Возможность привлечения внебюджетных средств на реализацию проектов.
- Опыт взаимодействия с федеральными органами исполнительной и законодательной власти и международными организациями.
- Развитые коммуникативные возможности в части поиска партнеров, формирования научно-технологических консорциумов, сопровождения и консультирования проектной деятельности.
- Взаимодействие с другими технологическими платформами.

Возможности

1. Консультативная и экспертная поддержка проектов и исследований.
2. Подбор оптимальных современных инновационных технологий для реализации проектов.
3. Совместно с ОАО «Федеральный центр проектного финансирования» ВЭБ содействие в подготовке проектов, их реализации и привлечение внебюджетных средств на их реализацию.
4. Организация обмена опытом и сотрудничества с зарубежными и российскими представителями научных организаций и производственных предприятий.
5. Создание комплексных решений на базе PLM-технологий для автоматизации инженерной деятельности российских предприятий.

6. Разработка и реализация проектов по обеспечению физической защиты предприятий и объектов промышленности, энергетики, транспорта и т.д.
7. Организация и проведение экспертизы промышленной безопасности зданий и сооружений на опасном производственном объекте, технических устройств, применяемых на них, промышленной безопасности документации на консервацию, ликвидацию опасного производственного объекта.
8. Разработка и реализация проектов с использованием инновационных технологий в сфере жилищно-коммунального хозяйства.

Комплексные проекты полного цикла, реализуемые несколькими участниками Технологической платформы

- Реализация проекта по обеспечению физической защиты инфраструктурных и производственных объектов.
- Налажено серийное производство фильтров «Элемент фильтрующий торфяной», выпускаемых в соответствии с ТУ 0391-018-02997983-98 в объеме 2000 м³/год.

Наиболее значимые проекты, реализуемые Технологической платформой

1. Проект по созданию комплексного решения на базе PLM-технологий для автоматизации инженерной деятельности предприятия.
2. Пилотный проект: «Интегрированная информационная система управления устойчивым развитием территории (региона)» (в развитие концепции построения и развития АПК «Безопасный город»).
3. Разработка средств высокоскоростной обработки данных информационных сенсоров в системах ситуационного управления.
4. Разработано и внедрено более 600 систем очистных сооружений поверхностного стока и локальных очистных сооружений для механической гравитационной очистки поверхностного стока на торфяных фильтрах.
5. Разработано и успешно используется на ТЭС и АЭС отечественное дезинфицирующее средство «Серебряная пуля».
6. Реализация проекта по герметизации городских систем канализации от притока неограниченного количества грунтовых и инфильтрационных вод.

НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ



Большов Леонид Александрович

академик РАН, научный руководитель ИБРАЭ РАН,
заведующий кафедрой



Кондратенко Петр Сергеевич

д.ф.-м.н., зав. лабораторией теоретической физики,
зам. заведующего кафедрой,
Почетный профессор МФТИ

Госэкзамен по специальности, 2016 г.



Кафедра проблем безопасного развития современных энергетических технологий

ИБРАЭ РАН тесно сотрудничает в сфере научно-образовательной деятельности с одним из ведущих вузов России — Московским физико-техническим институтом. С 1992 года в ИБРАЭ РАН действует кафедра проблем безопасного развития современных энергетических технологий, входящая в организационную структуру факультета проблем физики и энергетики МФТИ. Кафедра осуществляет подготовку специалистов для работы в новой, бурно развивающейся области науки, связанной с исследованием общих закономерностей протекания экологических и промышленных катастроф, разработкой научных методов оценки рисков, мониторинга и анализа чрезвычайных ситуаций.

На кафедре работают: академик РАН Большов Л. А., академик РАН Саркисов А. А., а также 10 докторов и 9 кандидатов наук.

Кафедра готовит специалистов по следующим научным направлениям:

- современные физические модели и программные средства для анализа безопасности АЭС, объектов ЯТЦ, объектов хранения и окончательной изоляции РАО;
- современные алгоритмы и численные методы моделирования физических процессов теплогидродинамики;
- системы радиационно-экологического мониторинга и методов анализа риска для здоровья населения и окружающей среды;
- стратегическое планирование утилизации атомного флота РФ и реабилитации объектов обслуживающей его инфраструктуры;
 - программные средства аварийной готовности и реагирования в случае ЧС;
 - экономическая эффективность производства электроэнергии с учетом экологии и безопасности;
 - объектовые и территориальные системы радиационно-химического мониторинга;
 - информационные системы.

Студентам читаются около двух десятков кафедральных лекционных курсов. С учетом растущих требований к качеству подготовки выпускников, учебная программа кафедры постоянно совершенствуется, корректируются существующие и вводятся новые курсы лекций.



Занятия проводят как специалисты ИБРАЭ, так и сотрудники и преподаватели других организаций и вузов. Занятия проводятся в учебно-методическом центре, оборудованном современными компьютерами и средствами оргтехники.

Профессорско-преподавательский состав кафедры проблем безопасного развития современных энергетических технологий

Типовой учебный план кафедры:

- Занятия начинаются на 3-м курсе в весеннем семестре. Третьекурсники слушают четыре дисциплины, в том числе обзорный курс «Введение в специальность», в рамках которого ведущие сотрудники Института знакомят студентов со всеми направлениями исследований, проводимых в ИБРАЭ РАН. Это дает студентам возможность выбрать специализацию и научного руководителя.
- На 4-м курсе студенты слушают шесть лекционных дисциплин, занимаются на семинаре по специальности и работают над дипломным проектом (выпускная квалификационная работа — ВКР), который защищают по окончании 8-го семестра, получая степень бакалавра.
- Далее при желании продолжить обучение и наличии рекомендации научного руководителя студенты поступают в двухгодичную магистратуру и занимаются научной работой в ИБРАЭ РАН. Кроме этого, пятикурсники продолжают посещать семинары по специальности и слушают одиннадцать лекционных курсов.

Доклад Кондратенко П. С. на заседании кафедры проблем безопасного развития современных энергетических технологий





- 6-й курс посвящен научной работе на кафедре и учебным занятиям не предусматривает. Зимой студенты сдают госэкзамен по специальности. Результаты научной работы становятся содержанием магистерской диссертации (МД). Студенты защищают ее по окончании 12-го семестра и получают степень магистра.

*Преподаватели и студенты кафедры.
После госэкзамена по специальности*

Дисциплины бакалавриата:

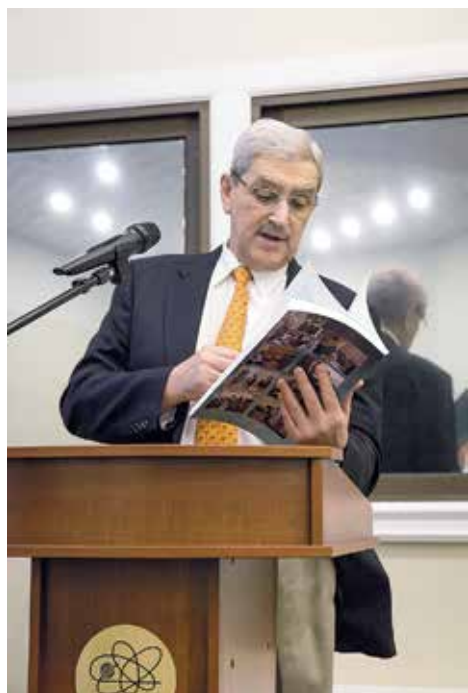
- введение в специальность;
- вычислительные системы и информационные технологии;
- кинетика физических процессов в твердых телах;
- математическое моделирование и вычислительные методы;
- моделирование турбулентных течений;
- нейтронная физика в ядерных реакторах;
- основы радиационной биологии;
- программирование на «C++»;
- современные методы анализа данных — геостатистика, нейронные сети;
- теоретические основы гидродинамики и теплопереноса;
- теория ядерных реакторов.

Дисциплины магистратуры:

- аномальные режимы переноса в сильно неоднородных средах;
- гидродинамика многофазных течений;
- моделирование тяжелых аварий;
- системы поддержки принятия решений;
- феноменология радиационных аварий;
- физика быстропротекающих газодинамических процессов;

*На семинаре по курсу «Моделирование
турбулентных течений». Преподаватель
д.т.н., профессор Филиппов А. С.*





- физико-математические модели и программные комплексы в радиоэкологии;
- физические основы радиоэкологии;
- численные методы в механике деформируемого твердого тела;
- экономика безопасности энергетики;

Студенты кафедры имеют возможность одновременно с учебной работой в научных подразделениях ИБРАЭ РАН.

Наиболее перспективные выпускники могут остаться работать в ИБРАЭ РАН, а также поступить в аспирантуру ИБРАЭ РАН или МФТИ.

Институт активно участвует в международном научном сотрудничестве, и к этой деятельности привлекаются студенты и аспиранты кафедры.

Успешно работающие студенты и аспиранты получают стипендию Дирекции института.

Совет молодых ученых

В ИБРАЭ РАН традиционно большое внимание уделяется поддержке молодых ученых. С целью улучшения условий их работы, повышения заинтересованности и привлечения молодежи в Институт, в 2007 году в ИБРАЭ РАН был создан Совет молодых ученых и специалистов (СМУиС). Деятельность Совета осуществляется при активной поддержке администрации Института и лично академика Л. А. Большова.

Большов Л. А. представляет сборник конкурсных работ победителей и призеров ШМУ ИБРАЭ РАН на XVII Школе молодых ученых ИБРАЭ РАН

Награждение лауреатов конкурса 2017 года на лучшую работу молодых ученых ИБРАЭ РАН

XVIII Школа молодых ученых ИБРАЭ РАН «Безопасность и риски в энергетике»





Ежегодное спортивное мероприятие,
организованное СМУиС
«День здоровья». 2016 г.

Совет не только представляет интересы студентов, аспирантов, молодых ученых, но и обеспечивает им информационную поддержку, а также ежегодно проводит мероприятия по повышению профессиональной квалификации молодых специалистов.

СМУиС организует семинары «Введение в специальность» для третьекурсников базовой кафедры МФТИ в ИБРАЭ РАН, на которых ведущие ученые и специалисты рассказывают об актуальных и перспективных направлениях работ Института. Участие в этих семинарах дает студентам возможность выбрать научного руководителя и тематику своих дальнейших исследований.

Заседание Совета молодых ученых



Одной из основных задач Совета является стимулирование научной деятельности молодых ученых. В связи с этим СМУиС участвует в организации и проведении комплекса ежегодных мероприятий, включающих в себя ежегодный конкурс на лучшую научную работу и традиционную научную конференцию Школы молодых ученых ИБРАЭ РАН «Безопасность и риски в атомной энергетике». В рамках Конференции проводятся тренинги публичных выступлений для докладчиков, а также лекции ведущих специалистов атомной отрасли. Работы участников публикуются в Сборнике трудов конференции. На церемонии торжественного закрытия Школы молодых ученых руководитель ИБРАЭ РАН вручает победителям и призерам почетные грамоты. СМУиС также организует научные семинары и курсы повышения квалификации для молодых сотрудников.



Деятельность Совета, помимо основной, научной, составляющей включает в себя и организацию различных культурно-массовых и спортивных мероприятий с целью сплочения молодежи Института. Регулярно проводятся молодежные вечера, интеллектуальные турниры и брейн-ринги, спортивные праздники, матчи по мини-футболу и шахматам. Еще одним важным аспектом деятельности СМУиС является организация экскурсий на объекты атомной отрасли для молодых сотрудников Института, демонстрация тематических научно-популярных и художественных фильмов.

Интеллектуальный турнир между командами ИБРАЭ РАН, АО «НИКИЭТ» и НИЦ «Курчатовский институт»

Технический тур группы молодых ученых и специалистов ИБРАЭ РАН на объекты атомной отрасли в г. Обнинск





Обухова Ирина Геннадьевна

Зав. аспирантурой

Аспирантура

В настоящее время в Институте осуществляется подготовка аспирантов по следующим направлениям:

- 03.06.01 Физика и астрономия;
- 09.06.01 Информатика и вычислительная техника;
- 14.06.01 Ядерная, тепловая и возобновляемая энергетика и сопутствующие технологии;
- 20.06.01 Техносферная безопасность.

Форма обучения — очная.

Кандидаты сдают вступительные экзамены по английскому языку и специальности. Иногородним аспирантам предоставляется общежитие Российской академии наук. Аспиранты, обучающиеся на бюджетной основе, получают стипендию и могут работать в ИБРАЭ РАН в качестве научных сотрудников.

Диссертационный Совет

С середины 1990-х в ИБРАЭ РАН на регулярной основе проводятся защиты кандидатских и докторских диссертаций по тематикам, связанным с проблемами обеспечения безопасности атомной энергетики. В настоящее время в Институте действует диссертационный совет Д 002.070.01 (создан в соответствии с приказом Рособнадзора от 23.01.2009 № 34-8) по защите диссертаций на соискание кандидатских и докторских степеней по четырем специальностям номенклатуры специальностей научных работников, утвержденной приказом Минобрнауки России от 25.02.2009 № 59:

- 01.04.14 — «Теплофизика и теоретическая теплотехника» (физико-математические науки);
- 05.14.03 — «Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации» (технические науки).

*Защита диссертации Ведерниковой М. В.
«Метод комплексного обоснования
безопасности и экологической
приемлемости пунктов хранения
радиоактивных отходов на завершающей
стадии их жизненного цикла» на соискание
ученой степени кандидата технических
наук*





Защита диссертаций в конференц-зале
ИБРАЭ РАН

В состав Диссертационного совета входят ведущие ученые и специалисты ИБРАЭ РАН в области теплофизики и теплогидравлики, нейтронной физики и физики реакторов, математического моделирования, геостатистики, радиоэкологии, обращения с радиоактивными отходами и ОЯТ, разработки систем аварийного реагирования и стратегического планирования.

Возглавляет Совет научный руководитель ИБРАЭ РАН академик Л. А. Большов.

За период 1995–2018 гг. в Институте были успешно защищены 31 кандидатская и 11 докторских диссертаций по актуальным проблемам современной физики, теоретическим и практическим аспектам обеспечения безопасности атомной энергетики. Более трети из числа защитившихся представляют научные и производственные учреждения атомной отрасли России и ряда зарубежных стран, что подчеркивает авторитетность диссертационного совета ИБРАЭ РАН в мировой научной среде. За последние 5 лет ученые степени присуждены 12 соискателям, 10 из них — сотрудники ИБРАЭ РАН.

Продуктивная работа диссертационного совета обусловлена как высокой научной квалификацией его членов, так и организационной и технической поддержкой со стороны Института. Дирекция ИБРАЭ РАН для проведения заседаний диссертационного совета предоставляет помещение (специально оборудованный конференц-зал с возможностью аудио-видео записи и прямой трансляции с помощью Web-камеры) с соответствующей оргтехникой, обеспечивает его работу необходимыми материальными средствами.



Калантаров Валентин Евграфович

к.т.н., ученый секретарь

НАУЧНО-ИЗДАТЕЛЬСКАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ



Журналы, издаваемые ИБРАЭ РАН

Публикации ИБРАЭ РАН

ИБРАЭ РАН активно ведет научно-издательскую деятельность. В рамках этой деятельности отдел информационных систем регулярно осуществляет выпуск печатных изданий — монографий и сборников научных трудов сотрудников Института, материалов и сборников докладов ежегодных конференций молодых ученых ИБРАЭ РАН, препринтов, внутриотраслевых отчетов, инструкций. С 2011 года ИБРАЭ РАН издает научный и информационно-аналитический журнал «Арктика: экология и экономика», а с 2017 года — научно-технический журнал «Радиоактивные отходы». Активно развиваются интернет-портал Института и другие связанные с ним онлайн-ресурсы.

Монографии и сборники научных трудов ИБРАЭ РАН

Институтом опубликовано более 60 крупных научных трудов, авторами и соавторами которых выступают сотрудники ИБРАЭ РАН.

К ним относятся:

Сборники научных трудов, монографии, изданные ИБРАЭ РАН



- монографии, освещающие актуальные вопросы теоретической физики, проблемы обеспечения безопасности атомной энергетики, обращения с радиоактивными отходами, разработки систем аварийного реагирования и радиационного мониторинга;
- сборники научных трудов по основным направлениям деятельности Института;
- Российские национальные доклады «Итоги и перспективы преодоления последствий чернобыльской аварии» (издание было приурочено к 10-й, 15-й, 20-й, 25-й и 30-й годовщинам аварии).

Также ИБРАЭ РАН в период с 2002 года издано более 20 научно-популярных брошюр, направленных на повышение уровня осведомленности общества об основных темах, связанных с радиацией и атомной энергетикой.

Все эти издания доступны для скачивания в электронном виде в разделе публикации интернет-сайта ИБРАЭ РАН ibrae.ac.ru.



Сборники научных трудов, монографии,
изданные ИБРАЭ РАН

Материалы и сборники докладов научных конференций

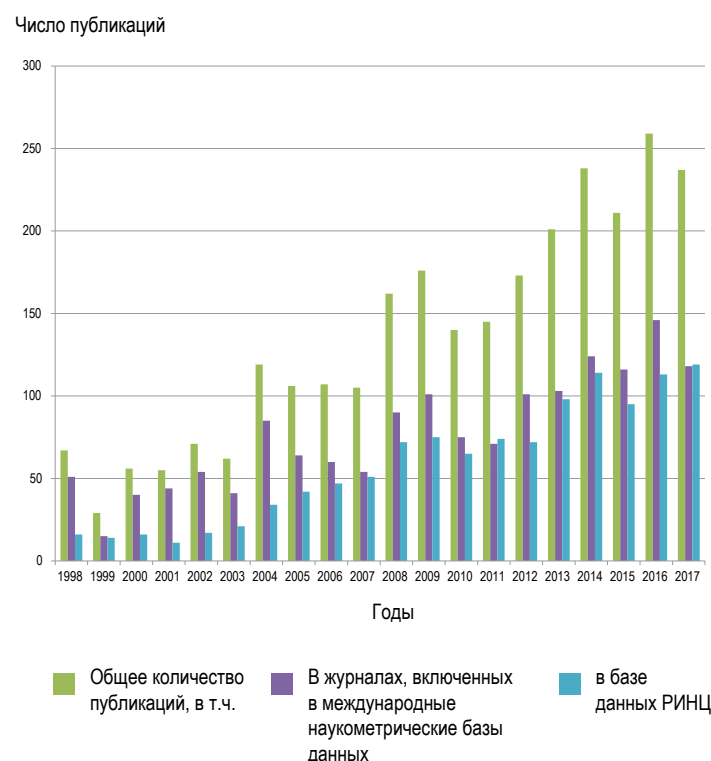
ИБРАЭ РАН изданы и опубликованы сборники докладов ряда научных и научно-практических конференций, организованных Институтом:

- X Российской научной конференции «Радиационная защита и радиационная безопасность в ядерных технологиях» (22–25 сентября 2015 г.);
- Международных конференций «Атомные станции малой мощности: новое направление развития энергетики» (11–12 ноября 2010 г. и 3–5 декабря 2013 г.);
- Симпозиума РАН, посвященного 15-й годовщине аварии на Чернобыльской АЭС (25 апреля 2001 г.);
- Ежегодных научно-практических конференций «Школа молодых ученых ИБРАЭ РАН».

Материалы конференций доступны для скачивания в электронном виде на интернет-сайте ИБРАЭ РАН.

Препринты ИБРАЭ РАН

Значительное место в научно-издательской деятельности Института занимает публикация препринтов научных трудов сотрудников ИБРАЭ РАН. С 1994 года издано более 300 препринтов, охватывающих все основные направления деятельности Института. Эти препринты доступны для скачивания в электронном виде в соответствующем разделе интернет-сайта ИБРАЭ РАН.



Публикационная активность ИБРАЭ РАН за период 1998–2017 гг.



Главный редактор журнала «Арктика: экология и экономика» академик РАН
Ашот Аракелович Саркисов

Редакция журнала «Арктика: экология и экономика». Слева направо: сидят: Филин Б. Н., Саркисов А. А., Дубинко А. С., стоят: Митрофанова И. А., Суркова И. Е., Иоффе А. И., Наконечная Е. Л.



Научные журналы

ИБРАЭ РАН осуществляет издание, рассылку и информационное сопровождение издаваемых им рецензируемых научных журналов. Тематика этих периодических печатных изданий тесно пересекается с основными направлениями деятельности Института.

Журнал «Арктика: экология и экономика»

Научный и информационно-аналитический журнал «Арктика: экология и экономика» учрежден в 2011 году и является периодическим печатным изданием. Главный редактор журнала — советник РАН академик А. А. Саркисов; председатель Редакционного Совета — научный руководитель ИБРАЭ РАН академик Л. А. Большов. Периодичность издания составляет 4 выпуска в год; к середине 2018 года опубликовано уже 30 выпусков журнала. С декабря 2015 года журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК по отраслям наук «Экономические науки» и «Науки о Земле» и группам научных специальностей «Кораблестроение» и «Безопасность деятельности человека»; с 2017 года всем научным статьям присваивается международный цифровой индекс DOI.

В декабре 2016 года журнал «Арктика: экология и экономика» удостоился диплома лауреата главной награды международных экологов — Премии GlobalEcoBrand в номинации «Eco Mass-Media-2016» за экологическое просвещение, образование и воспитание



Цель издания журнала состоит в представлении широким слоям научной общественности, работникам федеральных и региональных органов законодательной и исполнительной власти, научно-производственных предприятий, сотрудникам бизнес-структур результатов современных научных исследований и прикладных разработок по ключевым проблемам изучения, экономического развития и обеспечения экологической безопасности арктического региона.



Редакционная политика журнала направлена на:

- привлечение ведущих российских и зарубежных ученых и специалистов к комплексному освещению актуальных проблем освоения Арктики;
- публикацию результатов наиболее актуальных научных исследований и практических работ по перспективным направлениям арктической проблематики;
- изучение важнейших эколого-географических факторов и рисков, влияющих на возможности социально-экономического развития арктических регионов;
- создание научной базы для обоснования стратегических государственных и отраслевых решений по осуществлению хозяйственной деятельности в Северном Ледовитом океане и прилегающих территориях Арктической зоны Российской Федерации.

Тематика журнала включает в себя следующие рубрики:

- «Экономика и управление народным хозяйством Арктической зоны» — публикация результатов научных исследований по изучению экономических систем различных масштабов, уровня и сфер деятельности в Арктической зоне, их состояния, развития и прогнозирования, а также методов и способов управления этими системами;
- «Экология» — исследования, направленные на анализ экологического состояния Арктики, отдельных ее территорий и акваторий, а также на оценку антропогенного влияния на природную среду Арктики;
- «Научные исследования в Арктике» — научные исследования водных масс и дна Северного Ледовитого океана, прилегающих территорий, климата Арктики и его влияния на климат Земли;
- «Изучение и освоение природных ресурсов Арктики» — результаты научных работ в области прогноза, поиска и разведки месторождений

Заседание Редакционной коллегии журнала «Арктика: экология и экономика» (февраль 2018 г.).

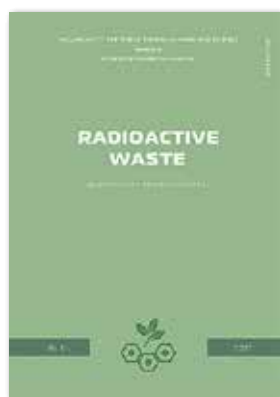
Слева направо: Фаузер В. В., Трякин В. Н., Саркисов А. А., Филин Б. Н., Суркова И. Е., Дубинко А. С., Тишков А. А., Дианский Н. А., Грузинов В. М., Богоявленский В. И., Илюхин В. Н., Волков А. В.

Сайт журнала «Арктика: экология и экономика» <http://arctica-ac.ru>



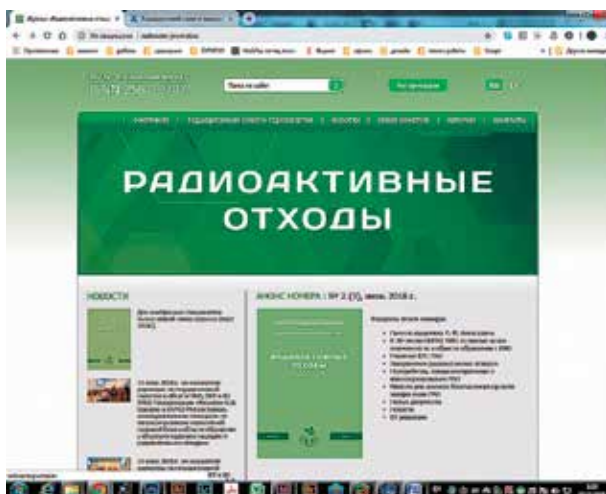


Саркисов А. А. знакомит с журналом «Арктика: экология и экономика» коллег из норвежской делегации



Англоязычная версия журнала «Радиоактивные отходы» № 1(1) 2017

Сайт журнала «Радиоактивные отходы»
<http://radwaste-journal.ru>



нефти, газа и других минеральных ресурсов, включая морские полезные ископаемые, разработки и эксплуатации этих месторождений;

- «Кораблестроение для Арктики» — теоретические и практические исследования, проектирование и оптимизация конструкции кораблей, судов и морских сооружений различного назначения для ледовых арктических условий;

- «Проблемы Северного морского пути» — исследования текущего состояния и перспектив развития СМП и атомного ледокольного флота России с учетом приоритетов по поддержанию Северного морского пути в статусе национальной российской транспортной магистрали;

- «Новые технологии освоения Арктики» — посвящена проблемам разработки новых и совершенствования существующих технологий освоения недр Арктической зоны и рационального использования ее природных ресурсов;

- «Проблемы регионов» — научные исследования факторов, влияющих на устойчивость развития арктических регионов, эффективность социально-экономической политики и управления природопользованием;

- «Государственное управление в Арктике» — обсуждение вопросов государственного управления структурными преобразованиями в народном хозяйстве, актуальных форм и механизмов взаимодействия Российской Федерации и ее регионов при решении ключевых вопросов социально-экономического развития Арктической зоны.

- «Безопасность деятельности человека в Арктике» — освещение проблем, связанных с обеспечением безаварийного функционирования хозяйственных объектов в Арктике и предотвращением ущерба природной среде, вызванного их эксплуатацией, а также разработка технологий и технических средств ликвидации последствий экологических аварий и катастроф.

- «Качество и уровень жизни коренных малочисленных народов Севера» — информационно-аналитические материалы по проблемам жизнедеятельности коренного населения Арктической зоны России, сохранения его этнического ядра и культурного наследия с учетом влияния экономического развития арктических регионов на качество жизни северных народов.

В настоящее время проводится подготовка к включению журнала в международную наукометрическую базу данных Scopus.

Журнал «Радиоактивные отходы»

Научно-технический журнал «Радиоактивные отходы» издается ИБРАЭ РАН с 2017 года. Периодичность издания составляет 4 выпуска в год на русском и английском языках. В журнале освещаются основные проблемы и достижения отечественной и зарубежной науки в области безопасного обращения с радиоактивными отходами, образующимися на различных стадиях жизненного цикла объектов использования атомной энергии и использования радиоактивных веществ и источников



ионизирующего излучения в различных отраслях промышленности, науки и медицины. Основная цель издания журнала состоит в обобщении и пропаганде научных достижений в сфере решения проблем обращения с радиоактивными отходами и создания безопасной и социально приемлемой системы их окончательной локализации, интенсификация и углубление обмена опытом между российскими и зарубежными специалистами, работающими по тематике РАО.

Первое заседание редакционной коллегии журнала «Радиоактивные отходы», посвященное обсуждению и решению основных вопросов его деятельности. 3 октября 2017 года

Тематики журнала:

- создание функционирования Единой государственной системы обращения с РАО;
- захоронение РАО: размещение, проектирование, сооружение и обоснование безопасности пунктов захоронения, критерии приемлемости для захоронения РАО;
- безопасность пунктов хранения РАО: проекты консервации, мониторинг, технологии и оборудование для проведения работ по консервации пунктов размещения особых РАО;
- технологии обращения с РАО: минимизация образования, в том числе при выводе из эксплуатации, переработка и кондиционирование РАО, новые установки, опыт эксплуатации;
- система государственного учета и контроля;
- нормативно-правовое обеспечение обращения с РАО.

Журнал «Радиоактивные отходы» был представлен на совещании Высших Договаривающихся сторон в штаб-квартире МАГАТЭ. 21 мая 2018 года

В состав Редакционного Совета и Редакционной Коллегии журнала входят ведущие российские ученые и специалисты атомной отрасли, представляющие научные, научно-производственные и проектные организации Госкорпорации «Росатом», учреждения Российской академии наук и ведущие университеты РФ. Председатель Редакционного Совета — академик Б. Ф. Мясоедов, главный редактор журнала — научный руководитель ИБРАЭ РАН академик Л. А. Большов.

За один год работы в журнале опубликовано 60 статей, авторы которых представляли 47 организаций.



Международное сотрудничество



*ИБРАЭ РАН ведет широкомасштабное
плодотворное научное сотрудничество
с ведущими международными,
государственными и неправительственными
организациями в сфере обеспечения
безопасности атомной энергетики,
радиационного мониторинга и аварийного
реагирования.*



ИБРАЭ РАН осуществляет международное сотрудничество по следующим научным направлениям:

- анализ безопасности РУ АЭС, включая реакторы нового поколения на быстрых нейтронах;
- обращение с радиоактивными материалами и отходами;
- экологическая безопасность;
- радиационный мониторинг и аварийное реагирование;
- снижение угрозы радиологического терроризма;
- повышение квалификации специалистов ядерной отрасли;
- информирование населения и коммуникации по вопросам радиационных рисков.



**Шпинькова Лариса
Геннадьевна**

к.ф.-м.н., начальник отдела международных
научно-технических проектов

«Тридцатилетняя история Института отмечена плодотворным научным сотрудничеством с такими международными организациями, как Международное агентство по атомной энергии (МАГАТЭ, IAEA), Агентство по ядерной энергии Организации экономического сотрудничества и развития (NEA/OECD), Комиссия Европейских Сообществ (СЕС), Международный научно-технический центр (ISTC), Всемирная ядерная ассоциация (WNA), Фонд экологического партнерства «Северное измерение» (NDEP), Европейский Банк реконструкции и развития (EBRD) и многие другие. В качестве высококвалифицированной экспертной организации ИБРАЭ РАН принимал непосредственное участие в реализации ряда межправительственных соглашений и международных программ в партнерстве с правительственными и коммерческими институтами США, Германии, Франции, стран Скандинавии и др.».

СОТРУДНИЧЕСТВО В СФЕРЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Основным направлением международной деятельности Института в данной сфере было и остается участие в совместных с зарубежными партнерами исследовательских проектах, посвященных изучению различных вопросов обеспечения безопасности АЭС.

Наиболее значимыми из этих проектов являются:

- проект RASPLAV-MASKA, организованный NEA/OECD;
- проект ISTC-PARAMETER (при поддержке Международного научно-технического центра);
- параллельные проекты ERCOSAM-SAMARA (в рамках сотрудничества Росатом — Евратом);
- международная стандартная задача ICSP MASLWR, проводящаяся под эгидой МАГАТЭ;
- расчетный бенчмарк ATMI-2, проводимый рабочей группой WGAMA NEA/OECD;
- международный расчетно-аналитический бенчмарк BSAF по моделированию протекания тяжелой аварии на энергоблоках 1–3 АЭС «Фукусима-1» (под эгидой NEA/OECD);
- проект NEA/OECD HYMERES, посвященный проблемам обеспечения комплексной безопасности при тяжелых авариях с выходом водорода в контеймент АЭС;
- согласованный исследовательский проект МАГАТЭ «Моделирование поведения топлива в аварийных условиях» (FUMAC);
- согласованный исследовательский проект МАГАТЭ «Анализ экспериментов по расхолаживанию реактора после его останова» (EBR-II);
- согласованный исследовательский проект МАГАТЭ «Анализ возможных решений и экспериментальное исследование аварийно-устойчивого топлива для водоохлаждаемых реакторов»;
- проект NEA/OECD по определению термодинамических характеристик осколков топливных элементов и продуктов деления на основе анализа сценариев развития тяжелой аварии на атомной электростанции «Фукусима-1» (TCOFF).

В рамках этих и других проектов проводится верификация и кросс-верификация на экспериментальном материале разработанных в ИБРАЭ РАН физических и расчетных моделей, тяжелоаварийных (MELCOR, СОКРАТ) и топливных (SFPR и ряд других) кодов, как для реакторов на тепловых нейтронах с водяным теплоносителем, так и для перспективных реакторов на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем.



Важным направлением международного сотрудничества является обучение и методическая подготовка специалистов зарубежных надзорных органов в странах-импортерах российских атомных технологий (Болгария, Венгрия, Индия, Ирак, Китай, Словакия, Украина, Финляндия и др.). Реализация совместных с Госкорпорацией «Росатом» обучающих программ проводится сотрудниками ИБРАЭ РАН с использованием программно-технической и информационно-методической базы Института, в том числе разработанных в ИБРАЭ РАН компьютерных тренажеров и интегральных расчетных кодов.

Визит в ИБРАЭ РАН делегации французского Института радиационной защиты и ядерной безопасности (ИРСН) во главе с ген. директором Жан-Кристофом Ниелем, 9 февраля 2017 г.

Сотрудничество в сфере радиационного мониторинга и аварийного реагирования

Весомым достижением ИБРАЭ РАН стало участие в разработке и реализации в период 2005–2012 гг. международных проектов по усовершенствованию систем радиационного мониторинга и аварийного реагирования в Мурманской и Архангельской областях. Эти проекты, выполнявшиеся в рамках инициативы «Глобального Партнерства» стран «большой восьмерки» и Соглашения «О многосторонней ядерно-экологической программе в Российской Федерации» (MNEPR, Multilateral Nuclear Environmental Program in the Russian Federation), позволили создать современные территориальные системы АСКРО и аварийного реагирования, которые получили высокую оценку миссии МАГАТЭ (EPREV) и были рекомендованы в качестве модели для организации подобных систем в других регионах России.

Визит генерального директора Агентства по ядерной энергии Организации экономического сотрудничества и развития Уильяма Мэгвуда в ИБРАЭ РАН. 2017 г.



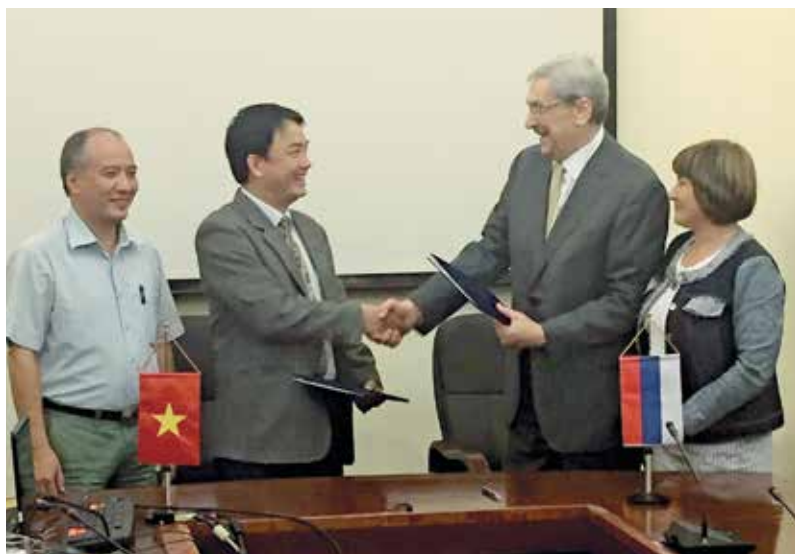


Визит в ИБРАЭ РАН делегации скандинавских стран в рамках российско-скандинавского сотрудничества в области аварийной готовности и реагирования. 17 октября 2017 г.

Визит делегации ИБРАЭ РАН во главе с директором института Большовым Л. А. во Вьетнамский институт атомной энергии Винамом. 21–22 октября 2015 г.

ИБРАЭ РАН тесно сотрудничает с ведущими международными организациями и научно-техническими центрами в области создания аппаратных и программных средств радиационного мониторинга и аварийного реагирования, в том числе компьютерных расчетных кодов для прогнозирования радиационной обстановки в ближней и дальней зонах ЯРОО и моделирования миграции радионуклидов в атмосфере, водной среде и в условиях городской застройки (НОСТРАДАМУС, Нептун, Кассандра и др.). В частности, с помощью этих программных средств специалистами ТКЦ ИБРАЭ РАН был выполнен оперативный прогноз развития радиационной обстановки и рисков для населения в связи с аварией 11.03.2011 г. на АЭС «Фукусима-1», переданный японской стороне уже 13.03.2011 г.

Еще одной сферой международного сотрудничества ИБРАЭ РАН является внедрение образовательных программ по повышению оперативной готовности и обучению сотрудников служб аварийного реагирования, объектовых и территориальных АСКРО, а также подготовка и проведение комплексных учений и тренировок с участием зарубежных партнеров и наблюдателей. Одним из первых подобных учений стало подготовленное в партнерстве с IRSN (Франция) учение «Беккерель-1996». В рамках сотрудничества Российской Федерации в Арктическом Совете, при поддержке и участии наблюдателей Рабочей группы по





предотвращению чрезвычайных ситуаций, готовности к ЧС и реагированию на ЧС (ЕРРР) ИБРАЭ РАН подготовил и провел серию учений «Арктика» на ЯРОО в приарктических российских регионах, начиная с учения в 2002 г. на Билибинской АЭС.

В последние десятилетия особое внимание международного сообщества было уделено проблеме противодействия угрозам радиологического терроризма. ИБРАЭ РАН в сотрудничестве с МАГАТЭ и национальными академиями наук (NAS) США принимал активное участие в решении этой проблемы, как в части зрения приведения отечественной нормативно-правовой базы в области радиационной безопасности в соответствие международным стандартам, так и в плане разработки программных средств нового поколения для моделирования радиационной обстановки в условиях мегаполиса.

После аварии на АЭС «Фукусима-1» сотрудники ИБРАЭ РАН провели тщательный анализ аварийной ситуации, участвуя в международных проектах под эгидой МАГАТЭ и NEA/OECD, обсуждали извлеченные уроки с коллегами из Института радиационной защиты и ядерной безопасности Франции (IRSN).

Совместно с ГК «Росатом» ИБРАЭ РАН активно участвует в российско-скандинавском сотрудничестве в области аварийной готовности и реагирования.

Визит миссии Агентства по ядерной энергии (АЯЭ ОЭСР)

Прием представителей PR-агентств из 12 стран дальнего зарубежья и стран СНГ в рамках семинара, проводимого Департаментом коммуникаций «Росатом—Международная Сеть» совместно с Департаментом коммуникаций и Департаментом международного бизнеса Госкорпорации «Росатом»



Сотрудничество в сфере обеспечения ядерной, радиационной и экологической безопасности объектов атомного флота

Важнейшим итогом международных усилий в данной сфере стала разработка под руководством ИБРАЭ РАН и утверждение Стратегического Мастер-плана (СМП) комплексной утилизации объектов атомного флота и экологически безопасной реабилитации ядерно и радиационно опасных объектов на Северо-Западе России. Группу разработки СМП возглавил академик Л. А. Большов, а общее научное руководство осуществлял советник РАН академик А. А. Саркисов.

Работа над СМП — это пример крупномасштабного сотрудничества и координации усилий стран-доноров, органов государственной власти РФ федерального и регионального уровней, большого количества министерств, ведомств и организаций — исполнителей проектов, направленных на решение глобальной задачи — обеспечение полной и безопасной утилизации ядерного наследия холодной войны и экологической реабилитации региона. СМП был разработан в рамках Глобального Партнерства и Соглашения о MNEPR при финансовой поддержке Фонда NDER и при участии Великобритании, Германии, Италии, Норвегии, Швеции, Финляндии и ряда других стран. В настоящее время успешно продолжается реализация проектов и программ СМП при научно-технической поддержке со стороны ИБРАЭ РАН.

Ведущие ученые и специалисты Института принимают активное участие в семинарах и пленарных заседаниях Контактной Экспертной Группы (КЭГ) МАГАТЭ, деятельность ко-

торой посвящена решению актуальных вопросов международного сотрудничества в области радиационной безопасности и радиоз экологии.

Продолжается сотрудничество ИБРАЭ РАН со странами Европейского Союза по вопросам ликвидации радиоз экологических последствий наследия холодной войны в акватории и на дне арктических морей. В настоящее время ИБРАЭ РАН совместно с итальянской компанией Sogin и Норвежским агентством по радиационной защите работает над проблемой оценки последствий возможных инцидентов с затопленными радиационно опасными объектами в Арктике.

Сотрудничество в сфере экологии

Одним из наиболее актуальных направлений сотрудничества в сфере экологии является разработка методик безопасного обращения с радиоактивными отходами и их окончательного захоронения. ИБРАЭ РАН проводит фундаментальные и прикладные исследования по развитию математического аппарата и созданию на его основе расчетных кодов, предназначенных для моделирования распространения радионуклидов в различных геологических средах, в том числе неоднородных. Валидация разработанных математических моделей осуществляется путем моделирования результатов международных натурных экспериментов (MADE и др.) и участия в международных исследовательских программах (ASCEM и др.).

Еще одним важным направлением международного сотрудничества является разработка комплексных программ по



Члены международной группы экспертов по оценке СМП вместе с его разработчиками в EBRD, ноябрь 2007 г.



Встреча-семинар между специалистами ИБРАЭ РАН и IRSN по тематике аварийной готовности и реагирования на радиационные инциденты и аварии. Париж, 2017 г.

преодолению радиозкологических и социально-экономических последствий радиационных аварий. В частности, ИБРАЭ РАН принимал активное участие в реализации проекта «Радиозкология» в рамках Франко-Германской инициативы по оценке последствий чернобыльской аварии.

ИБРАЭ РАН в партнерстве с Госкорпорацией «Росатом» и МЧС России, НАН и МЧС Республики Беларусь является одним из координаторов российско-белорусской программы совместной деятельности по преодолению последствий чернобыльской аварии в рамках Союзного государства, осуществляя информационную и экспертную поддержку ее мероприятий. На технической базе и с участием специалистов Института был создан Российско-Белорусский информационный центр.

Двусторонние и многосторонние соглашения

Международная деятельность ИБРАЭ РАН осуществляется на основе двусторонних и многосторонних договоров и соглашений о сотрудничестве с различными международными и национальными организациями.

Среди международных соглашений и программ, в которых принимал участие ИБРАЭ РАН, можно выделить Соглашение «О многосторонней ядерно-экологической программе в Российской Федерации» (MNEPR), Соглашение между правительством Соединенных Штатов Америки и правительством Российской Федерации «О сотрудничестве в изучении радиационных воздействий с целью минимизации последствий радиационного загрязнения на здоровье населения и окружающую среду»; Программу сотрудничества в военной области по вопросам окружающей среды в Арктике (АМЕС), Декларацию о создании Арктического совета, Программу развития Организации Объединенных Наций в Российской Федерации (UNDP), Соглашение между Правительством Российской Федерации и Правительством Итальянской республики «О сотрудничестве в области утилизации российских атомных подводных лодок, выведенных из состава Военно-морского флота, и безопасности обращения с радиоактивными отходами и отработавшим ядерным топливом».

В рамках членства Российской Федерации в МАГАТЭ и NEA/OECD специалисты ИБРАЭ РАН участвуют в комитетах и рабочих группах этих организаций в качестве экспертов. Отметим, что самым первым зарубежным партнером ИБРАЭ

РАН стал французский институт радиационной защиты и ядерной безопасности (IRSN, ранее — IPSN), с которым был подписан Меморандум о взаимопонимании в сентябре 1990 г. С тех пор поддерживаются плодотворные и конструктивные отношения сотрудничества в разных областях, связанных с безопасностью ЯТЦ. В разные годы ИБРАЭ РАН поддерживал двусторонние научные связи со следующими зарубежными национальными организациями:

- Институт радиационной защиты и ядерной безопасности (IRSN), Франция;
- Комиссариат по альтернативным источникам и атомной энергии (CEA), Франция;
- Электрисити де Франс (EDF), Франция;
- Государственное агентство по обращению с радиоактивными отходами ANDRA, Франция;
- Общество по изучению установок и реакторов (GRS), Германия;
- Технологический институт Карлсруэ (KIT), Германия;
- Институт Пола Шеррера (PSI), Швейцария;
- Компания СОДЖИН С.п.А (SOGIN S.p.A.), Италия;
- Национальное агентство по радиационной безопасности (SSM), Швеция;
- Компания SKB International, Швеция;
- Норвежское агентство по радиационной защите (NRPA), Норвегия;
- Норвежский институт оборонных исследований (FFI), Норвегия;
- Агентство по ядерной и радиационной безопасности (STUK), Финляндия;
- Кембриджский университет, Великобритания;
- Национальные академии наук (NAS) США;
- Чикагский университет, США;
- Министерство энергетики (DOE), США;
- Аргоннская национальная лаборатория (ANL), США;
- Национальная лаборатория Айдахо (INL), США;
- Окриджская национальная лаборатория (ORNL), США;
- Брукхейвенская национальная лаборатория (BNL), США;
- Национальная лаборатория Саванна-Ривер (SRNL), США;
- Тихоокеанская Северо-западная национальная лаборатория (PNNL), США;
- Национальная лаборатория им. Лоуренса в Беркли (LBNL), США;
- Комиссия по ядерному регулированию (NRC), США;
- Американский фонд гражданских исследований и развития (CRDF), США;
- Вьетнамский институт атомной энергии ВИНАТОМ, Вьетнам;
- Корейский институт ядерной безопасности (KINS), Республика Корея;
- Объединенный институт энергетических и ядерных исследований НАН, Беларусь.

ПРИНЯТЫЕ СОКРАЩЕНИЯ

BWR	«кипящий» водо-водяной реактор	ЕББР	Европейский банк реконструкции и развития
CFD	вычислительная гидродинамика (Computational fluid dynamics)	ЕГАСКРО	Единая государственная автоматизированная система контроля радиационной обстановки на территории Российской Федерации
DNS	гидродинамическая модель турбулентности; прямое численное моделирование (Direct Numerical Simulation)	ЖМТ	жидкометаллический теплоноситель
EPREV	Emergency Preparedness Review (Миссия МАГАТЭ по рассмотрению аварийной готовности и реагирования)	ЖРО	жидкие радиоактивные отходы
IAEA	International Atomic Energy Agency (Международное агентство по атомной энергии)	ЖЦ	жизненный цикл
IRSN	Институт радиационной защиты и ядерной безопасности Франции (IPRCH)	ЗО	защитная оболочка АЭС
LES	гидродинамическая модель турбулентности; модель крупных вихрей (Large Eddy Simulation)	ЗОЖЦ	заключительная стадия жизненного цикла
MNEPR	Многосторонняя ядерно-экологическая программа в Российской Федерации (Multilateral Nuclear Environmental Program in the Russian Federation)	ЗЯРОО	затопленные ядерно и радиационно опасные объекты
NEA	Агентство по ядерной энергии (Nuclear Energy Agency)	ЗЯТЦ	замкнутый ядерный топливный цикл
OECD	Организация экономического сотрудничества и развития (Organisation for Economic Cooperation and Development)	ИАЦ	информационно-аналитический центр
PLM	управление жизненным циклом (Product Lifecycle Management)	ИББ	инженерные барьеры безопасности
PWR	реактор с водой под давлением	ИИИ	источник ионизирующего излучения
RANS	гидродинамическая модель турбулентности; модель напряжений Рейнольдса	ИР	источник радиоактивности
а.з.	активная зона реактора	ИС	информационная система
АПЛ	атомная подводная лодка	ИСУЖЦ	информационная система управления данными жизненного цикла
АР	аварийное реагирование	ИСУП	информационная система управления программой
АСКРО	автоматизированная система контроля радиационной обстановки	КИА	контрольно-измерительная аппаратура
АСММ	атомная станция малой мощности	КМ	конструкционные материалы
АТО	судно атомного технологического обслуживания	КЦ	кризисный центр
АЭС	атомная электростанция	КЭГ	Контактная экспертная группа МАГАТЭ
БВО	блок выемного отражателя	ЛВС	локальная вычислительная сеть
БН	реактор на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем	МАГАТЭ	Международное агентство по атомной энергии (IAEA)
БОП	блок обработки и передачи данных	МАЗД	мощность амбиентной эквивалентной дозы гамма-излучения (Зв/ч)
ВАО	высокоактивные отходы	МНТЦ	Международный научно-технический центр
ВВЭР	атомный реактор водо-водяного типа	МНЭПР	Многосторонняя ядерно-экологическая программа в Российской Федерации (MNEPR)
ВКУ	внутрикорпусные устройства	МОКС	перспективное ядерное топливо, смесь оксидов U и Pt, которое предполагается использовать в легководных энергетических реакторах (PWR и BWR)
ВПК	военно-промышленный комплекс	НАО	низкоактивные отходы
ГИС	геоинформационная система (GIS)	НДС	напряженно-деформированное состояние защитной оболочки
ГП	Глобальное партнерство	НИР	научно-исследовательские работы
ГХК	Горно-химический комбинат	НИОКР	научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы
		НИЦ	Национальный исследовательский центр
		НКМ	Нижнеканский массив горных пород
		НКР	напорная камера реактора

НПИ	нижний порог измерения дозиметрического прибора	САО	среднеактивные отходы
НРБ	нормы радиационной безопасности	САПР	Система автоматизированного проектирования (САД)
НЦУКС	Национальный центр управления кризисными ситуациями МЧС России	СВБР	реактор на быстрых нейтронах со свинцово-висмутовым теплоносителем
ОДЭК	опытно-демонстрационный энергокомплекс	СИЧ	счетчик излучений человека
ОИАЭ	объект использования атомной энергии	СКЦ	Ситуационно-кризисный центр Госкорпорации «Росатом»
ОПАС	Группа оказания экстренной помощи атомным станциям	СМП НКМ	Стратегический мастер-план исследований в обоснование безопасности сооружения, эксплуатации и закрытия пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов в Нижнеканском массиве горных пород
ОЭСР	Организация экономического сотрудничества и развития	СМП	Стратегический Мастер-план
ОЯТ	отработавшее ядерное топливо	СТП	стандарты предприятия
ПАТЭС	плавучая атомная теплоэлектростанция	СУБД	система управления базами данных
ПВХ	пункт временного хранения ОЯТ и РАО	СУРПК	система управления разработкой расчетных кодов
ПГ	парогенератор	ТАСКРО	территориальная АСКРО
ПГЗ	пункт глубинного захоронения	ТВС	тепловыделяющая сборка
ПГЗРО	пункт глубинного захоронения радиоактивных отходов	ТВС ПЗ	тепловыделяющая сборка периферийной подзоны
ПД	продукты деления;	ТВС ЦЗ	тепловыделяющая сборка центральной подзоны
ПДХ	пункт долговременного хранения ОЯТ и РАО	ТЖМТ	реакторная установка с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем
ПЗРО	пункт захоронения радиоактивных отходов	ТКВ	Теченский каскад водоемов
ПИЛ	подземная исследовательская лаборатория	ТКЦ	Технический кризисный центр ИБРАЭ РАН (в 2013 г. преобразован в ЦНТП)
ПКРВ	пассивный каталитический рекомбинатор водорода	ТО	токсичные отходы
ПКУ	Программа комплексной утилизации	ТП	технологическая платформа
ПН	проектное направление	ТРО	твердые радиоактивные отходы
ПО	программное обеспечение	УЛР	устройства локализации расплава а.з.
ППСИ	Природоохранное партнерство «Северное измерение»	УПОС	устройства, реализующие пассивную обратную связь реактивности реактора с расходом теплоносителя
ПРЛ	передвижная радиометрическая лаборатория	ФГБУН	федеральное государственное бюджетное учреждение науки
ПС	программное средство	ФЦП	Федеральная целевая программа
ПТБ	плавучая техническая база	ЦБОД	Центральный банк обобщенных данных по чернобыльской тематике
ПТК	программно-технический комплекс	ЦМП	центр мониторинга и прогнозирования
ПУГР	промышленный уран-графитовый реактор	ЦНТП	Центр научно-технической поддержки ИБРАЭ РАН (преобразован из ТКЦ в 2013 г.)
ПХРАО	постоянное хранилище радиоактивных отходов	ЦСОИ	центр сбора и обработки информации АСКРО
РАО	радиоактивные отходы	ЧАЭС	Чернобыльская АЭС
РБ	реактор на «быстрых нейтронах»; ядерный реактор, в активной зоне которого нет замедлителей нейтронов	ЧС	чрезвычайная ситуация
РБИЦ	Российско-Белорусский информационный центр	ЭЦП	электронная цифровая подпись
РИД	результат интеллектуальной деятельности	ЯРБ	ядерная и радиационная безопасность
РК	расчетный код	ЯРОО	ядерно и радиационно опасный объект
РМ	радиационный мониторинг	ЯТЦ	ядерный топливный цикл
РО АЗ	рабочие органы аварийной защиты	ЯЭУ	ядерная энергетическая установка
РО АР	рабочие органы автоматического регулирования		
РО КР	рабочие органы компенсации реактивности		
РСЧС	Российская единая система предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций		
РТ	радиологический терроризм		
РУ	реакторная установка		

ТЕРМИНЫ И ОБОЗНАЧЕНИЯ

ab initio	решение задачи из первых основополагающих принципов без привлечения дополнительных эмпирических предположений
CFD-код	компьютерная программа, реализующая вычислительную гидродинамическую модель турбулентности
авария проектная	авария, для которой в проекте атомной станции определены исходные события и конечные состояния и предусмотрены системы безопасности, обеспечивающие при независимом от исходного события отказе одного из элементов систем безопасности, учитываемом в проекте атомной станции, или при одной, независимой от исходного события, ошибке персонала ограничение ее последствий установленными для таких аварий пределами (НП-001-15)
авария запроектная	авария, вызванная не учитываемыми для проектных аварий исходными событиями или сопровождающаяся дополнительными по сравнению с проектными авариями отказами элементов систем безопасности сверх единичного отказа, реализацией ошибочных решений персонала (НП-001-15)
авария тяжелая	запроектная авария с повреждением твэлов выше максимального проектного предела (НП-001-15)
адвекция	перемещение потока жидкости или газа в горизонтальном направлении без перемешивания
активность	ожидаемое число ядер радионуклида, претерпевших спонтанные ядерные превращения в единицу времени. Единица измерения: Беккерель (Бк); 1 Бк = 1 распад/с
блок детектирования (дозиметр)	измерительный прибор на основе детектора излучения, обеспечивающий визуальное и/или электронное отображение данных измерения
бэр	биологический эквивалент рентгена — внесистемная единица поглощенной дозы излучения; 1 бэр соответствует поглощению 1 Р
диапазон измерения	диапазон значений МАЭД, в котором рабочие характеристики измерителя (дозиметра) удовлетворяют установленным требованиям
зиверт (Зв)	единица эквивалентной и эффективной эквивалентной доз в системе СИ. 1 Зв соответствует величине поглощенной дозы излучения, при которой в 1 кг вещества выделяется энергия в 1 Дж. Для гамма-излучения 1 Зв $\approx$ 115 Р
контейнмент	защитная оболочка АЭС
кориум	ядерное топливо
кюри (Ки)	внесистемная единица измерения активности радионуклидов; 1 Ки = $3,7 \cdot 10^{10}$ Бк
ликвидус	на фазовых диаграммах линия полного плавления твердых фаз
мультифизичный	подход, основанный на решении системы сопряженных (взаимосвязанных) задач
основная погрешность	максимальное отклонение показаний измерительного прибора от эталонного значения измеряемой величины в стандартных условиях калибровки.
перколяция	процесс фильтрации жидкостей через пористую среду
спринклерная система	устройства разбрызгивания воды, входящие в систему экстренного охлаждения реактора и обеспечения пожаробезопасности машинного зала АЭС
стратификация	расслоение в потоке жидкости или газа
твэл	тепловыделяющий элемент; основной конструктивный элемент активной зоны ядерного реактора, содержащий ядерное топливо
терафлопсный	суперкомпьютер со скоростью вычислений более 1 триллиона (10^{12}) операций с плавающей точкой в секунду
чувствительность к эталонному излучению	характеристика дозиметра, отображающая его способность реагировать на изменения плотности потока излучения
экзафлопсный	суперкомпьютер со скоростью вычислений более 1 квинтиллиона (10^{18}) операций с плавающей точкой в секунду



ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ БЕЗОПАСНОГО РАЗВИТИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

Основные направления исследований в области безопасности атомной энергетики

РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТ ЗА 1988—2018 гг.

Москва, 2018

УДК 621.039
ББК 31.4
075

Основные направления исследований в области безопасности атомной энергетики. Результаты работ за 1988–2018 гг. — Под общ. ред. акад. РАН Л. А. Большова ; Ин-т проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук (ИБРАЭ РАН). — М., 2018. — 240 с. : ил. — ISBN 978-5-6041296-0-9 (в пер.).

В 2018 году исполняется 30 лет Институту проблем безопасного развития атомной энергетики (ИБРАЭ РАН) — ведущей российской научной и экспертной организации в области комплексного решения проблем ядерной и радиационной безопасности. Вниманию читателей предлагается книга, которая представляет собой обзор основных направлений научно-исследовательской и организационной деятельности Института с момента его организации и по настоящее время.

В издании приведены наиболее значимые результаты фундаментальных и прикладных работ ИБРАЭ РАН в области создания современных физических моделей, вычислительных алгоритмов и компьютерных кодов, предназначенных для моделирования процессов в ядерных реакторных установках, процессов распространения радиоактивных веществ в различных средах, оценки и прогнозирования радиационных рисков для населения и территорий; разработки научных основ организации систем радиационного мониторинга, аварийного реагирования и ликвидации последствий радиационных аварий; стратегического планирования и проектного управления в сфере обеспечения радиационной безопасности атомной отрасли и объектов ядерного наследия; разработки и внедрения систем управления жизненным циклом объектов, наукоемкой продукции и программных комплексов. Перспективные направления деятельности Института связаны с участием в реализации федеральных целевых программ по созданию энерготехнологий нового поколения, в том числе ядерных реакторов на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем, развитием международного сотрудничества в сфере обеспечения безопасности использования атомной энергии.

Книга представляет интерес как для ученых, специалистов научных и проектно-конструкторских организаций атомной отрасли, сотрудников органов государственной власти и управления использованием атомной энергии, так и для широкого круга читателей, неравнодушных к проблемам ядерной и радиационной безопасности и охраны окружающей среды.

ISBN 978-5-6041296-0-9

Основные направления исследований в области безопасности атомной энергетики

РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТ ЗА 1988—2018 гг.

Дизайн и верстка: Наконечная Е. Л.

Выпускающий редактор: Суркова И. Е.

*Редакционно-техническая группа:
Иванов М. Ю., Митрофанова И. А., Турецкий С. В.*

Оригинал-макет подготовлен ИБРАЭ РАН

Формат 70х100 1/8 (230х270 мм)

Бумага матовая мелованная 115 г/м². Печать офсетная

Уч.-изд. л. 24,85. Усл.-печ. л. 30,0. Тираж 1000 экз.

Заказное