ИБРАЭ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ

ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ БЕЗОПАСНОГО РАЗВИТИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТ

за 2019 год

ИБРАЭ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ

ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ БЕЗОПАСНОГО РАЗВИТИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТ

за 2019 год

УДК 621.039
ББК 31.4
075

Основные результаты работ за 2019 г. — Под общ. ред. акад. РАН Л. А. Большова; Ин-т проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук (ИБРАЭ РАН). — М., 2020. — 98 с. : ил. — ISBN 978-5-6041296-1-6 (в пер.).

Настоящий годовой отчет представляет собой обзор основных направлений научно-исследовательской и научно-организационной деятельности ИБРАЭ РАН за 2019 год. В отчет вошли наиболее значимые результаты работ Института в области: обоснования безопасности АЭС; создания и внедрения в практику современных физических моделей, вычислительных алгоритмов и компьютерных кодов, предназначенных для моделирования процессов в ядерных реакторных установках; обоснования долговременной безопасности завершающих стадий жизненного цикла объектов использования атомной энергии; информационно-аналитического сопровождения разработки и реализации программ в сфере ЯРБ, обращения с ОЯТ и РАО, утилизации и экологической реабилитации объектов атомного флота; обеспечения безопасности населения, оценки и прогнозирования радиационных рисков, разработки научных основ организации систем радиационного мониторинга, аварийного реагирования и ликвидации последствий радиационных аварий; исследований в области теоретической физики, разработки численных методов и современных вычислительных алгоритмов; развития международного сотрудничества в области безопасности атомной энергетики. В отчете также приведены данные о развитии материально-технической базы Института, научно-образовательной и информационно-издательской деятельности ИБРАЭ РАН в 2019 году.

Издание предназначего для ученых и специалистов научных, проектно-конструкторских и эксплуатирующих организаций атомной отрасли, представителей органов государственной власти и управления использованием атомной энергии.

ISBN 978-5-6041296-1-6

Оригинал-макет подготовлен ИБРАЭ РАН

Подписано в печать 17.06.2020

Формат 60x90 1/8. Уч.-изд. л. 9,3. Усл.-печ. л. 12,25

Тираж 300 экз.

© Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, 2020

Большов Леонид Александрович

академик РАН,

научный руководитель ИБРАЭ РАН

Уважаемые коллеги, дорогие читатели!

Вашему вниманию предлагается первый годовой отчет об основных результатах работ ИБРАЭ РАН. В предшествующий период мы практиковали более объемные издания, дававшие представление об основном объеме работ за более крупные промежутки времени. Последний такой обзор был опубликован в 2018 году в канун 30-летия создания Института.

За прошедшие тридцать лет ИБРАЭ РАН выполнил большое количество работ в интересах федеральных органов исполнительной власти, крупных организаций и компаний как в России, так и за рубежом. Но, как правило, в этих конкретных работах активизировался научно-технический потенциал только одного или нескольких структурных подразделений Института. Исключение составляли кризисные ситуации, в ходе которых были задействованы все научно-технические и экспертные ресурсы Института. Наиболее знаменательными в этом смысле были 2011, 2013 и 2017 годы, и мы с гордостью вспоминаем, что смогли своевременно подготовить научно обоснованные и эффективные рекомендации по преодолению кризисных ситуаций. Но кризисы рано или поздно заканчиваются, а добрая память о нашей работе и наших достижениях должна быть сохранена. Поэтому при определении целей и содержания годового отчета мы исходили из необходимости более широкого ознакомления с основными направлениями нашей деятельности руководителей и специалистов ключевых организаций. Среди них организации, работающие в областях:

- *использования атомной энергии (эксплуатирующие организации, а также организации, занимающиеся конструированием и проектированием объектов ядерной техники, их сооружением, анализом и оценкой их безопасности);*
- *государственного регулирования безопасности во всех сферах;*
- *государственного управления, в том числе в сферах энергетики и промышленности, экономического развития, охраны здоровья населения и окружающей среды;*
- *научно-технической экспертизы физико-технических проблем развития энергетики, вопросов радиационной гигиены и охраны здоровья, охраны окружающей среды и экологической безопасности.*

В рамках годового отчета мы решили не делать акцент на финансовых результатах деятельности и выполнении многочисленных показателей эффективности, ограничившись лишь констатацией того факта, что ИБРАЭ РАН сохраняет место в группе научных организаций первой категории Минобрнауки РФ, а коллектив Института своевременно обновляется и развивается.

Основное внимание в отчете уделено фактически выполненным в 2019 году исследованиям и разработкам, которые уже в текущем году пойдут в практику или продолжат развитие. Иными словами — живым и развивающимся разработкам, многие из которых могут найти новое применение, в том числе по итогам ознакомления с настоящим отчетом.

Л. А. Большов

Матвеев Леонид Владимирович

д.ф.-м.н.

директор ИБРАЭ РАН

Уважаемый читатель!

Уже три десятилетия коллектив ИБРАЭ РАН показывает стабильно успешную работу. Прошедший год не стал исключением. Более того, в 2019 году выполнен, пожалуй, наибольший объем работ, включая, конечно, полное выполнение госзаданий. Эти достижения явились следствием серьезной и ответственной работы всего нашего коллектива, наличия высококвалифицированных кадров, активной позиции руководства, а также продуманной организации рабочего процесса на основе принципов и установок, заложенных научным руководителем ИБРАЭ академиком Л. А. Большовым, по-прежнему принимающим самое активное участие в руководстве Институтом.

К ключевым результатам прошлого года в первую очередь относится аттестация большого количества программных средств для анализа и обоснования безопасности объектов использования атомной энергии. Это важная веха в развитии каждого расчетного кода, которая открывает возможность его практического применения организациями, осуществляющими конструирование и проектирование объектов ядерной техники и их эксплуатацию. Разработанные программы и комплексы позволяют анализировать безопасность широкого круга объектов — от действующих энергоблоков АЭС с реакторами типа ВВЭР и БН до реакторных установок инновационного проектного направления «Прорыв».

В 2019 году получены знаковые результаты в разработке многофункциональных программно-технических комплексов: проведены приемо-сдаточные испытания программно-технического комплекса «Виртуально-цифровая АЭС с ВВЭР»; разработана экспертная система оценки напряженно-деформированного состояния защитных оболочек на Ростовской АЭС; начата разработка системы управления данными и процессами расчетных и экспериментальных научных исследований (система «УРАНИЯ»).

К стратегически важным результатам следует отнести начало реализации долговременной научной программы по обоснованию безопасности геологического захоронения РАО. Разработаны облик Подземной Исследовательской Лаборатории (ПИЛ), проект программы научного сопровождения горнопроходческих работ ПИЛ, впервые создана единая база геологических данных по всем проводившимся в районе размещения ПИЛ исследованиям.

В 2019 году надежно функционировал Центр научно-технической поддержки ИБРАЭ РАН, который в том числе обеспечил оперативную подготовку информационно-аналитической справки, позволившей предотвратить принятие неадекватных мер реагирования после радиационного инцидента в Архангельской области в августе 2019 года.

В рамках фундаментальных исследований получены новые результаты для моделирования течений со свободной поверхностью, трехмерного турбулентного течения воздуха в условиях городской застройки, динамики донных отложений, задач геофизической гидродинамики, задач неклассического переноса. Начато развитие новых направлений по водородной безопасности и созданию новых когерентных источников в коротковолновом диапазоне длин волн.

Серьезное внимание в Институте уделялось росту профессиональных и руководящих кадров. Сейчас среди руководителей отделений — четыре специалиста моложе 40 лет, двое из которых — доктора наук. Количество защищенных диссертаций в 2019 году было невелико — всего две диссертации. С одной стороны, это обусловлено большой загруженностью коллектива, с другой — требует самого пристального внимания.

В прошедшем году Институт пережил большую утрату — умер Р. В. Арутюнян, заместитель директора по науке, один из лидеров Института с самого дня основания. Светлая ему память.

Анализируя результаты прошедшего года, можно с уверенностью утверждать, что Институт не снижает высокого научного уровня своей продукции, успешно развивается, его деятельность крайне востребована. Далее в отчете представлены основные результаты, структурированные по направлениям: прикладные исследования проблем безопасности ядерных установок и комплексов, безопасность обращения с ОЯТ, РАО и вывода из эксплуатации ядерных установок, развитие систем аварийной готовности и реагирования, фундаментальные исследования.

Л. В. Матвеев

Содержание

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ИБРАЭ РАН 7

Коллектив и структура института в 2019 году 8

Направления научно-исследовательской деятельности Института 10

2. ОСНОВНЫЕ ИТОГИ РАБОТ НАУЧНЫХ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ В 2019 ГОДУ 11

2.1 БЕЗОПАСНОСТЬ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ 12

Разработка программного обеспечения для анализа безопасности атомных станций 12

Анализ безопасности ядерных энергетических установок 22

Расчетно-экспериментальные исследования теплофизических процессов в ядерных установках 27

Информационные технологии управления жизненным циклом объектов атомной энергетики 33

2.2. БЕЗОПАСНОСТЬ ЗАВЕРШАЮЩИХ СТАДИЙ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ОБЪЕКТОВ ЯДЕРНОЙ ТЕХНИКИ 37

Безопасность объектов обращения с ОЯТ, РАО и вывод из эксплуатации ядерных установок 37

Информационная поддержка разработки и реализации программ в сфере ЯРБ 49

Исследование проблем радиационной безопасности объектов атомного флота, АСММ и радиационно опасных объектов исследовательского назначения 52

2.3. БЕЗОПАСНОСТЬ НАСЕЛЕНИЯ 63

Развитие систем аварийной готовности и реагирования 63

2.4. РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ 70

Численные методы и вычислительные алгоритмы 70

Теоретическая физика 75

3. РАЗВИТИЕ ИНФРАСТРУКТУРЫ 80

4. МЕЖДУНАРОДНОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО 82

5. НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ И ИЗДАТЕЛЬСКАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ 85

Профильные кафедры 85

Аспирантура 88

Диссертационный совет 88

Издательская деятельность 89

6. ОБЩЕСТВЕННЫЕ ОРГАНИЗАЦИИ 94

Совет молодых ученых и специалистов 94

Первичная профсоюзная организация ИБРАЭ РАН 96

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ 97

1 Общие сведения об ИБРАЭ РАН

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики был создан в составе Академии наук СССР. Распоряжение Совета Министров СССР от 3 ноября 1988 г. № 2198р определило цели его создания: расширение и углубление фундаментальных исследований, создающих основу для обеспечения безопасности атомной энергетики. В настоящее время ИБРАЭ РАН является федеральным государственным учреждением науки, последовательно и успешно реализующим цели и задачи, поставленные при его организации.

Обстоятельства экономического и структурного кризиса, сопровождавшие создание и первые годы существования Института, сформировали жесткие критерии к условиям его функционирования: требовалась способность генерировать востребованную на практике научную продукцию мирового уровня, в том числе и зарабатывать средства за рубежом. Эти условия удалось выполнить. Уже в начале 1990-х годов под руководством директора, д.ф.-м.н. Л. А. Большова, были сформированы ядро научного коллектива Института и относительно стабильный портфель заказов от российских и зарубежных партнеров. Подобная ситуация сохранялась на протяжении длительного времени. Лишь в последние годы в структуре работ Института стали доминировать заказы российских организаций.

В целом за более чем 30 лет своего существования Институт выполнял крупные комплексы работ в интересах российских ведомств и организаций. Среди них МЧС России и Минатом России, ФААЭ, Госкорпорация «Росатом», Ростехнадзор, АО «Концерн Росэнергоатом». Зарубежными заказчиками работ Института в разные годы выступали: Комиссариат по атомной энергии и Институт радиационной защиты и ядерной безопасности (Франция), Департамент энергетики и Комиссия по ядерному регулированию (США), Ядерный исследовательский центр в Карлсруэ (Германия), Международное агентство по атомной энергии.

Специалистами Института освоен выпуск практически всего спектра типов научно-технической продукции. Среди них — не только отчеты, научные статьи, монографии и иные результаты интеллектуальной деятельности (патенты, изобретения, расчетные коды (программы для ЭВМ), базы данных, информационные системы и программно-технические комплексы), но и документы государственного и стратегического уровня. В их числе — проекты ведомственных и государственных программ и обосновывающих материалов к ним, стратегические мастер-планы, национальные доклады, проекты нормативно-правовых актов Российской Федерации.

Результаты деятельности Института нашли отражение в государственной политике Российской Федерации в области обеспечения ядерной, радиационной и экологической безопасности и мониторинга состояния объектов атомной энергетики и промышленности. Среди наиболее значимых работ прошлых лет необходимо отметить активное или решающее участие специалистов Института в таких областях деятельности, как:

- развитие научных основ расчетно-экспериментального моделирования поведения ядерных установок в запроектных режимах работы;
- анализ тяжелых аварий на АЭС и обоснование технических решений по локализации расплава ядерного топлива;
- обоснование оптимальных режимов функционирования защитных оболочек энергоблоков АЭС;

- обоснование необходимости развертывания программ по объектам ядерного наследия, в том числе обоснование сроков их реализации и содержания работ;
- комплекс работ по формированию российской системы радиационного мониторинга и аварийного реагирования;
- разработка и применение методов стратегического планирования для решения накопленных проблем в сфере обеспечения ядерной и радиационной безопасности;
- разработка предложений по повышению безопасности объектов ядерного наследия, в том числе их комплексов;
- развитие теоретических и методологических основ захоронения РАО;
- разработка нормативно-правовых основ Единой государственной системы обращения с РАО и методическое обеспечение ее функционирования;

Работы специалистов Института неоднократно отмечались престижными премиями, высокими государственными и ведомственными наградами, в том числе:

- академик РАН А. А. Саркисов удостоен международной премии «Глобальная энергия»;
- пятеро ведущих ученых ИБРАЭ РАН отмечены премиями Правительства Российской Федерации в области науки и техники;
- 15 ученых Института удостоены государственных наград Российской Федерации, среди которых ордена Александра Невского, Почета, Мужества, Дружбы, «За заслуги перед Отечеством» III и IV степени;
- Почетными знаками МЧС России, Госкорпорации «Росатом» и концерна «Росэнергоатом» было награждено 67, 39 и 14 специалистов ИБРАЭ РАН соответственно.

В 2017 году была установлена система категорирования академических институтов по ежегодным результатам научно-технической деятельности. В 2017—2019 годах ИБРАЭ РАН неизменно входил в первую категорию научных организаций.

КОЛЛЕКТИВ И СТРУКТУРА ИНСТИТУТА В 2019 ГОДУ

По состоянию на декабрь 2019 года общая штатная численность ИБРАЭ РАН составляла 574 человека, в том числе 435 сотрудников научных подразделений. Среди них: 4 академика РАН, 1 член-корреспондент РАН, 48 докторов наук и 123 кандидата наук. В Новосибирском филиале ИБРАЭ РАН работало 19 человек, в том числе 15 сотрудников научных подразделений, среди которых 1 член-корреспондент РАН, 2 доктора наук и 3 кандидата наук.

В структуре Института можно выделить три блока подразделений

Блок подразделений исследователей и разработчиков

Существующая структура исследовательских подразделений сформировалась под воздействием многих факторов, в том числе принятых в Академии наук традиций преемственности, и постоянно развивающейся системы требований к повышению эффективности научной деятельности.

Исследовательские подразделения представляют собой нерегулярную структуру в составе:

- 7 отделений, в состав которых входят как совокупности отделов, включающих в себя лаборатории, так и отдельные исследовательские лаборатории;
- 5 самостоятельных отделов;
- лаборатории теоретической физики.

В структуре Новосибирского филиала ИБРАЭ РАН представлен Отдел теплофизики и физической гидродинамики из 3-х исследовательских лабораторий.

Подразделения исследователей и разработчиков ориентированы в основном на самостоятельное решение отдельных государственных заданий или небольших заказных НИР. Решение задач крупных НИР, как правило, организуется на проектной основе и предусматривает участие многих исследовательских подразделений.

Одной из специалированных структур Института является созданный более 20 лет тому назад **Технический кризисный центр** ИБРАЭ РАН (с 2013 года преобразованный в Центр научно-технической поддержки (ЦНТП) ИБРАЭ РАН), который **осуществляет функционирование в круглосуточном режиме**.

Основные итоги работ научных подразделений представлены в разделе 2 настоящего годового отчета.

Блок подразделений технического, кадрового и финансового обеспечения

Эти службы Института ежегодно обеспечивают:

- функционирование всех инфраструктурных систем, в том числе энергоснабжения и систем связи, обеспечивающих непрерывный и надежный прием оперативной информации ведомственной и территориальных АСКРО, данных о состоянии энергоблоков всех российских АЭС и данных Гидрометеоцентра России;
- обслуживание, ремонт и эксплуатацию крупного парка вычислительной техники, включающего персональные компьютеры, рабочие станции, специализированные серверы и иные системы хранения данных, вычислительный кластер, а также парка средств оргтехники;
- договорной, плановый и юридический отделы этого блока ежегодно обеспечивают участие Института в более чем 100 конкурсных процедурах, а также заключение более 50 контрактов с заказчиками работ и более 100 конкурентных закупок услуг, оборудования и материалов;
- программа обеспечения качества обеспечивает своевременное и качественное исполнение контрактов и лицензионную готовность Института.

Вопросы развития материально-технической базы Института освещены в разделе 3 настоящего отчета.

Блок подразделений научно-организационного обеспечения и международного сотрудничества

Подразделения обеспечивают:

- отчетность Института, в том числе по наукометрическим показателям;

435 СОТРУДНИКОВ НАУЧНЫХ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ, СРЕДИ НИХ:

4 АКАДЕМИКА РАН

1 ЧЛЕН-КОРРЕСПОНДЕНТ РАН

48 ДОКТОРОВ НАУК

123 КАНДИДАТА НАУК

- свободный онлайн-доступ сотрудников Института к российским и международным информационным ресурсам, в том числе, ведущим международным и российским наукометрическим базам данных;
- работу Диссертационного совета Д 002.070.01 по защите диссертаций на соискание кандидатских и докторских степеней;
- работу базовых кафедр МФТИ и МИФИ и подготовку аспирантов;
- международное сотрудничество;
- подготовку к публикации и издание научных трудов Института и научных журналов «Арктика: экология и экономика» и «Радиоактивные отходы»;
- администрирование и обеспечение контентом интернет-сайта ИБРАЭ.

Основные итоги работ по указанным направлениям представлены в разделах 4,5 настоящего отчета.

233 275 ПРОСМОТРОВ

СУММАРНОЕ КОЛИЧЕСТВО ЗА 2019 ГОД НА САЙТАХ ИБРАЭ РАН И ВЫПУСКАЕМЫХ НАУЧНЫХ ЖУРНАЛОВ

НАПРАВЛЕНИЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ИНСТИТУТА

В последние годы ИБРАЭ РАН осуществлял научно-исследовательскую деятельность по следующим основным направлениям:

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

- разработка численных методов и вычислительных алгоритмов;
- теоретические исследования процессов тепло- и массопереноса и исследования в смежных областях физики;

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

- разработка программного обеспечения для анализа безопасности атомных станций;
- анализ безопасности ядерных энергетических установок;
- разработка и внедрение компьютерных кодов нового поколения для моделирования физико-химических, нейтронно-физических, теплогидравлических процессов в ядерных реакторах на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем и анализа ядерного топливного цикла;
- расчетно-экспериментальные исследования теплофизических процессов в ядерных установках;
- развитие и внедрение информационных технологий управления жизненным циклом объектов атомной энергетики;

Исследования в области безопасности объектов использования атомной энергии на завершающих стадиях жизненного цикла:

- информационно-аналитическая и организационно-нормативная поддержка комплексного решения проблем ядерной и радиационной безопасности, обращения с ОЯТ и РАО, разработки 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 выводу из эксплуатации объектов ядерного жизненного цикла;
- информационно-аналитическое сопровождение утилизации и экологической реабилитации объектов атомного флота; исследования, направленные на 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 в различных регионах Российской Федерации;
- разработка и внедрение современных программно-технических средств поддержки принятия решений в задачах аварийного реагирования;
- развитие и обеспечение деятельности Центра научно-технической поддержки ИБРАЭ РАН;
- активное участие в подготовке и практической реализации российских и международных учений по ликвидации последствий радиационных аварий.

Исследования социально-экономических аспектов развития атомной энергетики:

- участие в разработке и 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.

2 Основные итоги работ **научных подразделений** в 2019 году

- Разработка программного обеспечения для анализа безопасности атомных станций
- Информационная поддержка разработки и реализации программ в сфере ЯРБ
- Анализ безопасности ядерных энергетических установок
- Исследование проблем радиационной безопасности объектов атомного флота, АСММ и радиационно опасных объектов исследовательского назначения
- Расчетно-экспериментальные исследования теплофизических процессов в ядерных установках
- Развитие систем аварийной готовности и реагирования
- Информационные технологии управления жизненным циклом объектов атомной энергетики
- Численные методы и вычислительные алгоритмы
- Безопасность объектов обращения с ОЯТ, РАО и вывод из эксплуатации ядерных установок
- Теоретическая физика

2.1 БЕЗОПАСНОСТЬ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА БЕЗОПАСНОСТИ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ НАПРАВЛЕНИЯ

Заместитель директора

В. Ф. Стрижов

д.ф.-м.н.

(vfs@ibrae.ac.ru)

Заведующий отделением

Н. А. Мосунова

д.т.н.

(nam@ibrae.ac.ru)

КЛЮЧЕВЫЕ СПЕЦИАЛИСТЫ:

В. М. Алипченков , к.ф.-м.н. — разработка моделей и ПК для моделирования процессов тепломассообмена

А. А. Белов — разработка моделей и ПК для нейтронно-физического расчета

А. В. Болдырев, к.ф.-м.н. — разработка ПК для моделирования тепловыделяющих элементов

П. Н. Вабищевич, д.ф.-м.н. — разработка эффективных численных методов решения систем дифференциальных уравнений, разработка ПК для связанного трехмерного моделирования теплогидравлических, термомеханических и нейтронно-физических процессов

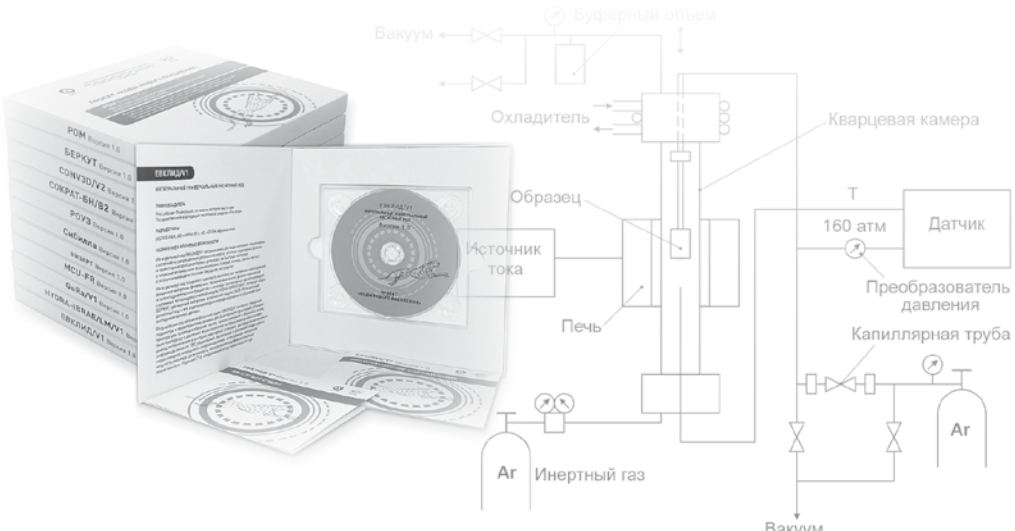
А. Б. Исаков, к.ф.-м.н. — разработка сервисного программного обеспечения

В. Н. Медведев, к.т.н. — разработка ПК для решения задач механики строительных конструкций

А. А. Сорокин., к.ф.-м.н. — разработка моделей и ПК для моделирования поведения продуктов деления в контурах и помещениях АЭС

А. С. Филиппов, д.т.н. — разработка моделей и ПК для моделирования поздних стадий тяжелых аварий на АЭС, решение прикладных проблем механики сплошной среды

В. В. Чуданов, к.ф.-м.н. — разработка эффективных численных алгоритмов, моделей и ПК для моделирования процессов теплогидродинамики, в том числе, двухфазных



1 РАЗРАБОТКА, ВЕРИФИКАЦИЯ, ВАЛИДАЦИЯ И АТТЕСТАЦИЯ КОДОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ И ДОСТИЖЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРОЕКТОВ И ТЕХНОЛОГИЙ ПРОЕКТНОГО НАПРАВЛЕНИЯ «ПРОРЫВ» (РЕАКТОРНЫЕ УСТАНОВКИ НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ, АППАРАТЫ И ТЕХНОЛОГИИ ЗАМКНУТОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА И ДР.)

2 РАЗРАБОТКА КОМПОНЕНТОВ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ АЭС, В ЧАСТНОСТИ, ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА «ВИРТУАЛЬНО-ЦИФРОВАЯ АЭС С ВВЭР»

3 РАЗРАБОТКА, ВЕРИФИКАЦИЯ, ВАЛИДАЦИЯ И АТТЕСТАЦИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ РАСЧЕТНЫХ КОДОВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ АЭС С РЕАКТОРНЫМИ УСТАНОВКАМИ ТЕХНОЛОГИИ ВВЭР, ВКЛЮЧАЯ ВОЗМОЖНОСТЬ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЯЖЕЛЫХ АВАРИЙ, ИЗУЧЕНИЕ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ТИПОВ ТОПЛИВА И ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

4 ВЫПОЛНЕНИЕ РАСЧЕТОВ АЭС С РЕАКТОРНЫМИ УСТАНОВКАМИ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ ИХ БЕЗОПАСНОСТИ ИЛИ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНЫХ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ

НАПРАВЛЕНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ:

ОСНОВНЫЕ ИТОГИ 2019 ГОДА:

1. Разработка кодов нового поколения для обоснования безопасности и достижения оптимальных технологических показателей проектов и технологий проектного направления «Прорыв» (работы выполнены по заказу Госкорпорации «Росатом» и АО «Прорыв»):

- завершена **разработка и аттестация** (с выдачей аттестационного паспорта) современных кодов нового поколения по различным направлениям математического моделирования: теплогидродинамического DNS кода **CONV-3D**; интегрального кода для мультифизичного моделирования реакторных установок на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем **ЕВКЛИД**; программы для решения задач переноса нейтронов и гамма-квантов в многогрупповом SnPm приближении методом конечных элементов на неструктурированных тетраэдральных сетках **ODETTA** и других. Программы готовы для использования в атомной отрасли, в том числе и вне проектного направления «Прорыв», для решения актуальных научно-технических задач;
- разработан **проект программы расчетно-экспериментальных исследований процессов, протекающих при гипотетических авариях с разрушением активной зоны реактора со свинцовым теплоносителем**. Определены ключевые процессы (физико-химические, теплогидравлические), которые требуют расчетно-экспериментального изучения. Оценены возможности имеющейся экспериментальной базы и сформулированы предложения по направлениям проведения экспериментов, перечню измеряемых и контролируемых величин, набору расчетных обоснований. Реализация программы позволит изучить феноменологию протекающих процессов, разработать адекватные математические модели и провести валидацию расчетных кодов, предназначенных для моделирования процессов разрушения активной зоны реакторных установок со свинцовым теплоносителем;
- разработана и включена в теплогидравлический код **HYDRA-IBRAE/LM** модель, учитывающая распределение паровых пузырей в тяжелом жидкометаллическом теплоносителе по размерам с учетом их взаимодействия. Результаты одного из расчетов с использованием новой модели приведены на рис. 2.1.1, из которого следует, что в результате расчетов могут быть получены скорости паровых пузырей различных размеров, в том числе, разнонаправленные в пределах одной ячейки (теплогидравлического канала) расчетной сетки. Аналоги в отечественных и зарубежных теплогидравлических кодах отсутствуют. Включение указанной модели позволяет выполнять расчетные обоснования установок

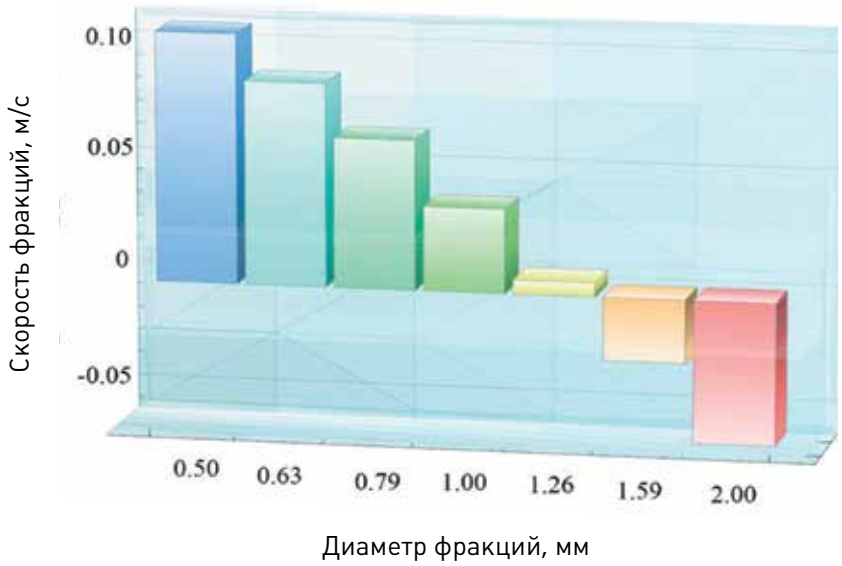


Рисунок 2.1.1 – Скорости групп паровых пузырей в теплогидравлическом канале (отрицательное направление – против течения жидкости)

с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем на новом уровне. С использованием расчетного кода в АО «НИКИЭТ» выполнена серия расчетных обоснований безопасности РУ БРЕСТ-ОД-300 при разрыве трубок парогенератора, а также РУ БР-1200 в различных режимах работы;

- завершена разработка усовершенствованной версии твэльного кода **БЕРКУТ-У**, предназначенного для определения параметров твэлов, облучаемых в активных зонах экспериментальных, действующих и проектируемых установок на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем. Код позволяет моделировать твэлы с UO_2, смешанным оксидным уран-плутониевым (МОКС) и смешанным нитридным уран-плутониевым (СНУП) топливом, газовым и жидкометаллическим подслоем. Наиболее важными моделями кода, не имеющими аналогов в отечественных и зарубежных программах, являются:
  - **модель поведения дефектов кристаллической решетки**, описывающая поведение точечных и протяженных дефектов в топливе и, в конечном итоге, — зарождение и развитие газонаполненной пористости;
  - **модель наработки и транспорта** нескольких сотен наиболее важных радионуклидов, образующихся в топливе при облучении;
  - **термодинамическая модель облученного топлива**, оперирующая с сотней химических соединений продуктов деления (ПД) при облучении и описывающая распределение ПД по молекулярным и фазовым состояниям с учетом их радиоактивных взаимопревращений.

  Расчетный код валидирован на обширном экспериментальном материале для оксидного топлива, включая интегральные и ампульные тесты. Для валидации нитридной версии модуля использовались уникальные данные по облучению сборок в реакторах БОР-60 и БН-600. **Код передан на аттестацию в ФБУ «НТЦ ЯРБ».**

  С использованием кода БЕРКУТ-У выполнены обоснования возможности продления облучения экспериментальных тепловыделяющих сборок со СНУП топливом в РУ БН-600;

- выпущены или актуализированы **учебные пособия и учебные версии** по ряду кодов нового поколения (в частности, БЕРКУТ-У, ЕВКЛИД, HYDRA-IBRAE/LM). Проведена **III Школа-семинар пользователей кодов нового поколения**, на котором обучение использованию 8 кодов нового поколения прошли 62 специалиста, в том числе сотрудники организаций, не входящих в контур предприятий Госкорпорации «Росатом» (рис. 2.1.2).

2. Разработка компонентов программно-технического комплекса «Виртуально-цифровая АЭС с ВВЭР» (ПТК ВЦАЭС) (работы выполнены по заказу АО «ВНИИАЭС», генеральный заказчик — АО «Концерн «Росэнергоатом»).

ПТК «Виртуально-цифровая АЭС с ВВЭР» (разработан по заказу АО «Концерн «Росэнергоатом». Основные разработчики — ИБРАЭ РАН и АО «ВНИИАЭС» (рис. 2.1.3). ПТК ВЦАЭС представляет собой функционирующую на высокопроизводительной вычислительной системе совокупность интегрированных в общей среде расчетных кодов, обеспечивающих согласованное моделирование многообразных процессов,

Рисунок 2.1.2 – Открытие III Школы-семинара пользователей кодов нового поколения

протекающих в системах и элементах АЭС с РУ технологии ВВЭР. ПТК оснащен несколькими рабочими местами и имеет широкие возможности по отображению результатов моделирования и управлению ходом расчетов. С помощью входящих в состав ПТК 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.

В ИБРАЭ РАН разработана **система высокоточных кодов**, входящих в состав ПТК, которые позволяют моделировать следующие процессы:

- **нейтронно-физические** в активной зоне реакторной установки (трехмерные расчеты ТВС гексагональной геометрии на основе диффузионного приближения);
- **теплогидравлические** в первом контуре и в системе помещений защитной оболочки (моделирование процессов в контурах циркуляции теплоносителя и а.з. осуществляется на основе канального приближения; по выбору пользователя для моделирования процессов, протекающих в а.з., может использоваться приближение пористого тела или ячейковое приближение);
- **распространения тепла в твэле** (решается двумерное уравнение теплопроводности для топлива и оболочки твэла с учетом возможной многослойной структуры оболочки, как результата окисления циркониевого сплава);
- **наработки и выхода продуктов деления** в газовый зазор твэла (моделируется перенос продуктов деления внутри топлива и выход в открытую пористость, химические взаимодействия продуктов деления внутри топливных зерен и другие);
- **термомеханические** в топливе и оболочке твэла (деформирование и разрушение оболочки твэла моделируется с учетом изменения механических свойств материала оболочки вследствие окисления и выхода газообразных продуктов деления, приводящих к росту газового давления);
- **окисление и гидрирование оболочки твэла** (моделируется динамика роста слоев циркониевой оболочки в условиях высокотемпературного окисления);
- **распространения продуктов деления по первому контуру и в системе помещений защитной оболочки** (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);
- **разрушения а.з.** (модели двухфазной гетерогенной среды, описывающей сосуществующие в активной зоне твердую фазу и расплав, и конечно-элементных технологиях численного описания этой среды в рамках физиче-

Рисунок 2.1.3 — Группа разработчиков ПТК «Виртуально-цифровая АЭС с ВВЭР» из ИБРАЭ РАН и АО «ВНИИАЭС» и общий вид ПТК

ских допущений о процессе разрушения а. з. при тяжелой аварии);

- **поведения расплава на днище корпуса реактора и в устройстве локализации расплава** (решение двумерного нестационарного нелинейного уравнения теплопроводности, коэффициенты которого рассчитываются исходя из физических моделей).

Все вышеуказанные процессы моделируются согласованно друг с другом. Кроме того, высокоточные коды работают совместно с моделями АСУ ТП и системами второго контура, разработанными в АО «ВНИИАЭС».

В состав ПТК «Виртуально-цифровая АЭС с ВВЭР» включен также **набор прецизионных расчетных кодов** — теплогидродинамический (CFD), нейтронно-физический (на базе метода Монте-Карло) и термомеханический. Эти компоненты ПТК могут использоваться для проведения прецизионных уточняющих расчетов, настройки моделей упрощенных методик и кодов, кросс-верификации. В частности, в трехмерном термомеханическом коде FEMSolverThermomechanics реализованы следующие модели:

- теплопроводность;
- линейная упругость;
- пластичность;
- термоупругость;
- термопластичность.

Некоторые результаты расчетов с использованием кода FEMSolverThermomechanics приведены на рисунке 2.1.4.

Следует отметить, что входящие в состав ПТК ВЦАЭС высокоточные расчетные коды могут быть использованы как автономные программные продукты. Для этих целей каждый из модулей снабжен руководством пользователя и руководством по моделям, графическим интерфейсом пользователя, позволяющим произвести подготовку данных для расчета и визуализировать результаты моделирования.

В 2019 г. проведена **опытная эксплуатация, а также приемо-сдаточные испытания** ПТК ВЦАЭС, по итогам которых подтверждены сформулированные в техническом задании требования к отдельным компонентам и программно-техническому комплексу в целом. В частности, показана возможность моделирования различных режимов работы НВАЭС-2 (рисунки 2.1.5, 2.1.6), для ряда режимов выполнено сравнение с имеющимися экспериментальными данными, подтверждена возможность использования ПТК ВЦАЭС для верификации руководств по управлению тяжелыми авариями (РУТА), как инструмента инженерной поддержки Кризисного центра АО «Концерн «Росэнергоатом» при подготовке сценариев противоаварийных тренировок.

В дальнейшем планируется поэтапное внедрение ПТК «Виртуально-цифровая АЭС с ВВЭР» в деятельность Кризисного центра АО «Концерн «Росэнергоатом», его тиражирование на другие энергоблоки и решение прикладных задач, стоящих перед АО «Концерн «Росэнергоатом».

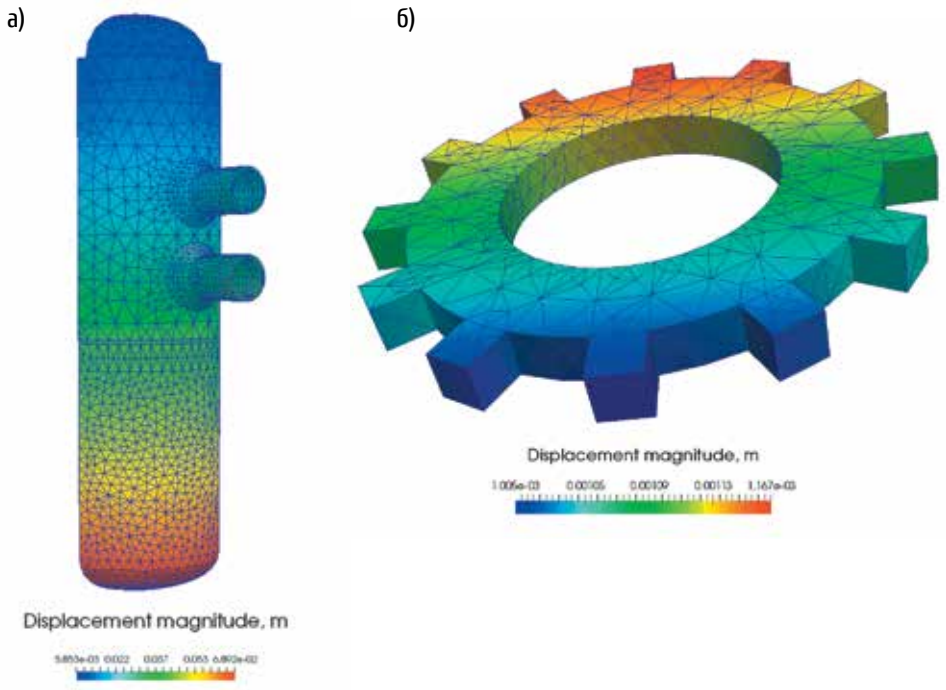


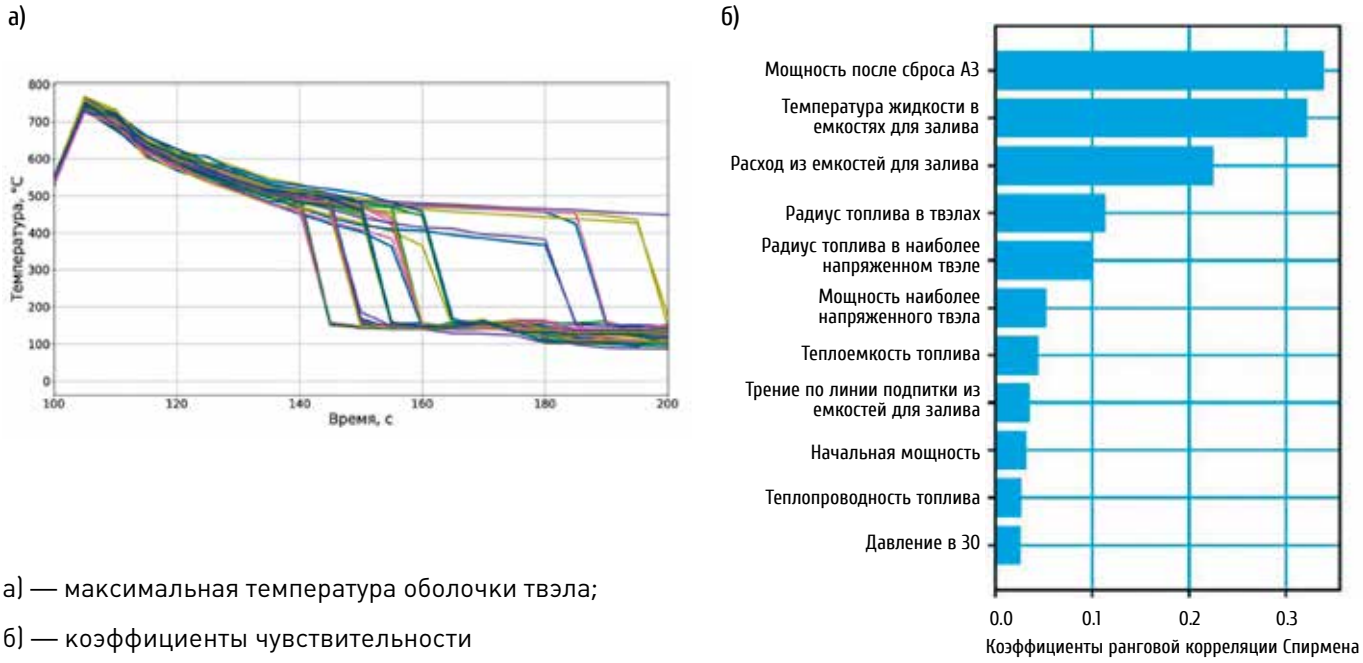
Рисунок 2.1.4 — Распределение перемещений

а) — корпус реактора под воздействием внутреннего давления и термического расширения, вызванного внутренним нагревом;

б) — стальная шестеренка под действием силы тяжести и давления на внутреннюю окружность

3. Расчетный анализ напряженно-деформированного состояния защитных оболочек АЭС с РУ ВВЭР-1000 (работы выполнены по заказу филиалов АО «Концерн «Росэнергоатом» Калининская АЭС, Нововоронежская АЭС, Ростовская АЭС).

В 2019 году с использованием программного комплекса **CONT**, разработанного в ИБРАЭ РАН и аттестованного в Ростехнадзоре, выполнен расчетный анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) защитных оболочек АЭС с РУ ВВЭР-1000 при испытаниях расчетным давлением с целью определения максимальной величины испытательного давления без снижения эксплуатационной надежности защитных оболочек. Установлено, что при поддержании достаточного уровня обжатия ЗО системой преднапряжения защитные оболочки рассмотренных АЭС выдержат однократное аварийное



а) — максимальная температура оболочки твэла;

б) — коэффициенты чувствительности

Рисунок 2.1.5 — Динамика изменения максимальной температуры оболочки твэла в течение первых 200 с при выполнении сквозного расчета сценария аварии «Большая течь при разрыве трубопровода первого контура с полной потерей всех источников переменного тока (более 24 ч)»

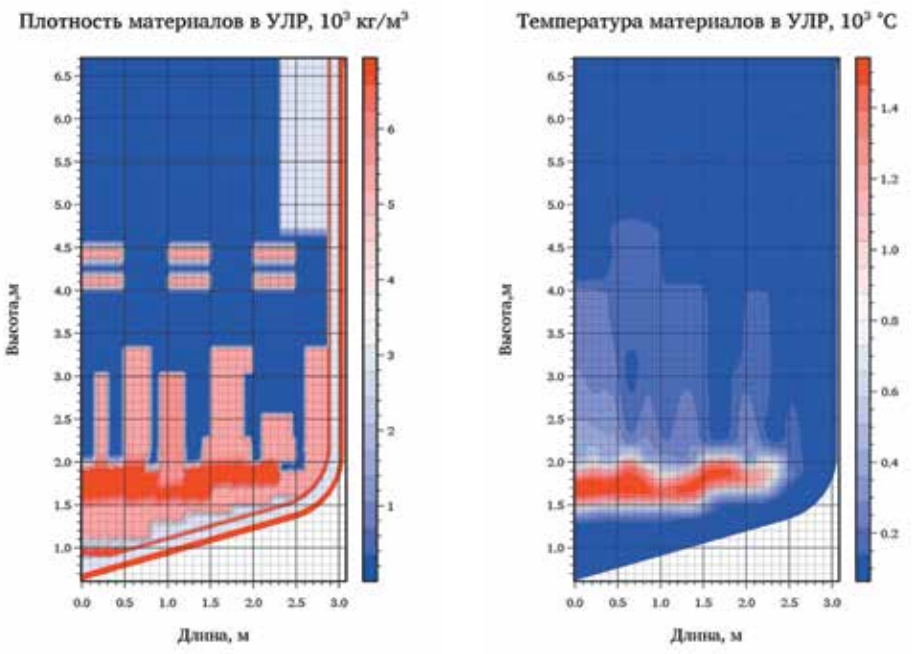


Рисунок 2.1.6 – Распределение плотности материалов и температуры в УЛР, полученное при выполнении сквозного расчета сценария аварии «Большая течь при разрыве трубопровода первого контура с полной потерей всех источников переменного тока (более 24 ч)»

воздействие, на которое они проектировались. Также сделан вывод, что нагружение защитной оболочки расчетным давлением, необратимо снижающим ее физические свойства в эксплуатационных режимах, является неоправданным.

По заказу АО «Концерн «Росэнергоатом» в ИБРАЭ РАН разработана экспертная система оценки напряженно-деформированного состояния защитных оболочек АЭС. Ее цель — анализ и обоснование работоспособности сооружения на протяжении всего срока эксплуатации.

Экспертная система построена на базе программного комплекса CONT. В качестве исходных данных система получает информацию с датчиков силы HB005 и преобразователей силы измерительных ПСИ-01, установленных под анкерами арматурных канатов, а также датчиков контрольно-измерительной аппаратуры (КИА), установленных в тело защитной оболочки во время строительства.

Экспертная система уже внедрена специалистами ИБРАЭ РАН на энергоблоках №№ 1, 2, 3 и 4 Ростовской АЭС.

Также в ИБРАЭ РАН разрабатываются методики расчета напряженно-деформированного состояния защитных оболочек АЭС при динамическом (сейсмическом) воздействии на основе нормативных подходов и численного метода суперэлементов. Разработана специальная полномасштабная модель реакторного отделения, которая позволяет рассчитывать и учитывать при динамическом анализе необходимое количество форм колебаний конструкции и их вклада в сейсмическую нагрузку. Создана конечно-элементная модель здания реакторного отделения, включая защитную оболочку, обстройку и модель грунтового основания (рис. 2.1.7).

4. Разработка модели первого контура энергоблока с РУ БРЕСТ-ОД-300 в составе интегральной расчетной математической модели ОДЭК, включая проведение расчетов отдельных режимов работы реакторной установки (работы выполнены по заказу АО «Прорыв»).

Модель первого контура РУ БРЕСТ-ОД-300 в составе интегральной расчетной математической модели опытно-демонстрационного энергокомплекса (ОДЭК) (рисунок 2.1.8) состоит из четырех независимых петель циркуляции свинцового теплоносителя с четырьмя ГЦНА.

В каждой петле моделируются независимые участки подачи теплоносителя от а.з. к модулям ПГ и его возврата в опускную часть центральной полости РУ. Кроме того, модель первого контура включает воздушный контур охлаждения для отвода тепла от первого контура в пусковых, аварийных режимах и при плановых остановах. Моделирование второго контура, АСУ ТП осуществляется по специализированным расчетным кодам, работающим согласованно с моделью первого контура.

Модель первого контура РУ БРЕСТ-ОД-300 построена на базе интегрального кода нового поколения ЕВКЛИД/V1. Верхнеуровневая нодализационная схема первой петли первого контура РУ БРЕСТ-ОД-300 приведена на рисунке 2.1.9. В 2019 году с использованием модели первого контура РУ БРЕСТ-ОД-300 в составе инте-

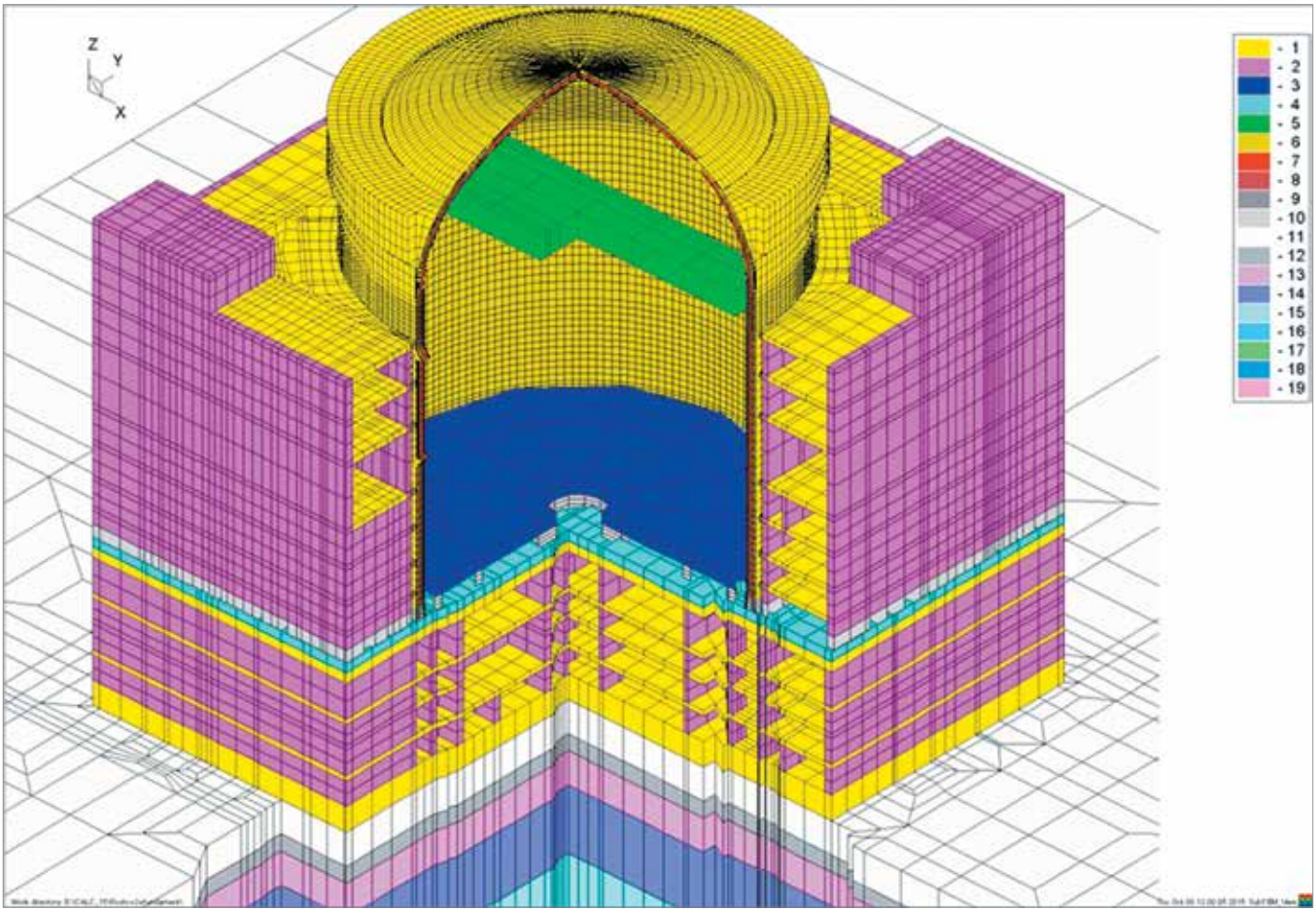


Рисунок 2.1.7 – Модель реакторного отделения АЭС с грунтовым основанием для моделирования сейсмического воздействия

Рисунок 2.1.8 – Полигон АО «Прорыв» с интегральной расчетной математической моделью опытно-демонстрационного энергокомплекса (ОДЭК)

гральной расчетной математической модели энергоблока с РУ БРЕСТ-ОД-300 проведены расчеты режимов нормальной эксплуатации и нарушений нормальной эксплуатации реакторной установки. Результаты расчетов использовались для анализа и верификации проектных решений. Особенно следует отметить результаты полного моделирования режима «холодного пуска» установки, которые продемонстрировали возможность пуска реактора с начальной мощности в 700 Вт с выходом на номинальную мощностьв 700 МВт в полном соответствии с проектным сценарием пуска.

5. Международное сотрудничество

Полученные специалистами Отделения результаты научно-исследовательских работ были представлены на ведущих российских и международных конференциях, на которых получили высокую оценку научного сообщества. Среди наиболее значимых форумов:

- **Девятая европейская конференция по тяжелым авариям ERMSAR 2019** (19—21 марта 2019 года, г. Прага, Чехия). Конференция была посвящена вопросам моделирования тяжелых аварий на АЭС с водяным теплоносителем, включая такие актуальные проблемы, как удержание расплава на внутрикорпусной и внекорпусной стадии тяжелой аварии, моделирование взаимодействия расплава с бетоном и выхода водорода, исследование сценариев протекания тяжелых аварий и направления развития тяжелоаварийных расчетных кодов. Заведующий лабораторией ИБРАЭ РАН, д.т.н. Филиппов А. С. представил результаты CFD-расчетов взаимодействия расплава с корпусом реактора в задаче о внутрикорпусном удержании расплава. Получены практически значимые результаты, в частности, показано, что учет толщины боковой стенки корпуса может существенно уменьшить проявление эффекта фокусировки на внешней поверхности, что приводит к уменьшению тепловой нагрузки на корпус и существенно влияет на результаты расчетных оценок возможности удержания расплава в корпусе реактора.
- **24-я Международная конференция по математическому моделированию и анализу** (28—31 мая 2019 года, г. Таллин, Эстония). Конференция была посвящена различным аспектам математического моделирования,

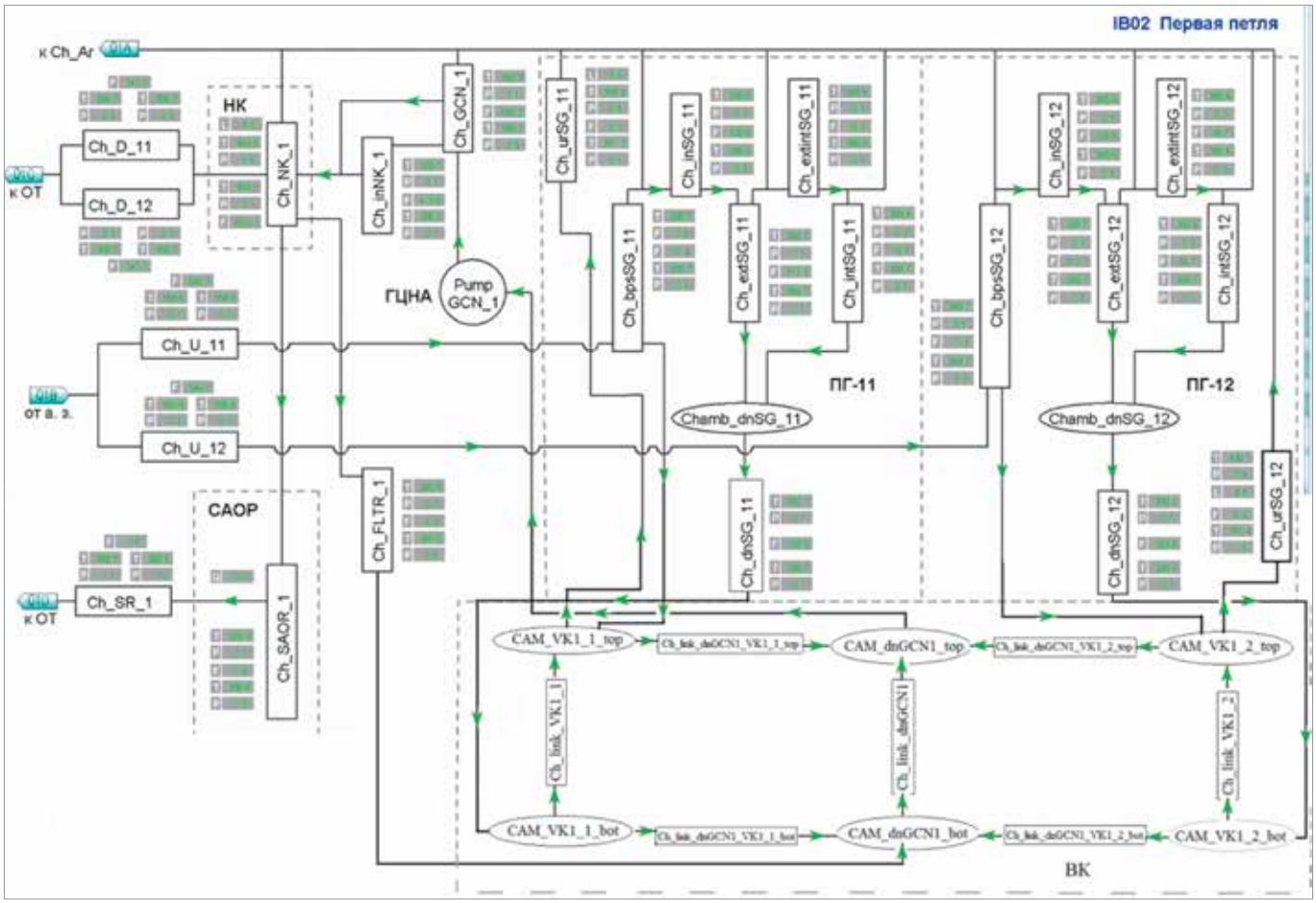


Рисунок 2.1.9 – Верхнеуровневая нодализационная схема первой петли первого контура РУ БРЕСТ-ОД-300

теории и практике использования численных методов при приближенном решении современных задач науки и техники. Профессор Вабищевич П. Н. (ИБРАЭ РАН) представил пленарный доклад, который вызвал большой интерес участников конференции. В докладе обсуждались фундаментальные проблемы вычислительной математики при приближенном решении нестационарных задач. При использовании безусловно устойчивых неявных аппроксимаций по времени стандартной является ситуация, когда для решения задачи на новом слое по времени применяются итерационные методы. Автором сформулированы условия, при которых не нарушается устойчивость решения нестационарной задачи при итерационной вычислительной реализации задачи на новом слое по времени.

- **13-я Международная конференция по эффективности топлива ВВЭР, моделированию и экспериментальной поддержке** (15—21 сентября 2019 года, г. Нессебр, Болгария). Цель конференции состояла в рассмотрении современных тенденций в развитии ядерного топлива, конструкционных материалов твэлов, а также в моделировании их поведения в условиях облучения в ядерном реакторе и последующего хранения. В докладе сотрудника ИБРАЭ РАН, к.ф.-м.н. Тарасова В. И. был выполнен обзор моделей и возможностей механистического топливного кода MFPR/R, приведены примеры расчетов, в которых описывалось поведение микроструктуры топлива и продуктов деления при разных режимах работы реактора, включая аварийные. Разработанные модели и расчетный код вызвали повышенный интерес зарубежных коллег. Представленный специалистами ИБРАЭ РАН постерный доклад, посвященный развитию и валидации модели эволюции пористости в зоне высокого выгорания таблетки, разработанной с учетом вклада многочастичных столкновений в коалесценцию пор в рамках метода Монте-Карло, занял второе место в конкурсе постерных докладов, уступив лишь экспериментальной работе группы авторов из Чехии.

КЛЮЧЕВЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАБОТ:

1. *Vabishchevich P. N.* Alternating triangular schemes for second-order evolution equations // Computational Mathematics and Mathematical Physics, 2019. — Vol. 59. — Iss. 2. — Pp. 266—274.

2. *Vabishchevich P. N.* Computational identification of the lowest space-wise dependent coefficient of a parabolic equation // Applied Mathematical Modelling, 2019. — Vol. 65. — Pp. 361—376.

3. *Seleznev E. F., Bereznev V. P., Chernova I. S.* Reactor kinetics using partial equations // Nuclear Science and Engineering, 2019. — Vol. 193. — Iss. 5. — Pp. 495—505.

4. *Tarasov V. I., Polovnikov P. V., Shestak V. E., Veshchunov M. S.* Development of the MFPR/R code for characterization of the rim zone and high burnup structure evolution in UO_2 fuel pellets // Journal of Nuclear Materials, 2019. — Vol. 517. — Pp. 214—224.

5. *Антропов А. С., Озрин В. Д., Стегайлов В. В., Тарасов В. И.* Связь поверхностной самодиффузии и подвижности пузырей в твердом теле: теория и атомистическое моделирование // Журнал экспериментальной и теоретической физики, 2019. — Т. 156. — № 7. — С. 125—134.

6. *Каменская Д. Д., Филиппов А. С.* Радиационный теплообмен в газовой полости над расплавом активной зоны реактора при тяжелой аварии // Атомная энергия, 2019. — Т. 126. — № 6. — С. 311—316.

7. *Чуданов В. В., Аксенова А. Е., Первичко В. А.* Моделирование кодом CONV-3D течений несжимаемой жидкости в круглой трубе в ламинарном, переходном и турбулентном режимах // Атомная энергия, 2019. — Т. 127. — № 5. — С. 295—298.

8. *Медведев В. Н., Киселев А. С., Киселев А. С., Стрижов В. Ф., Ульянов А. Н., Скорикова М. И.* Применение экспертной системы оценки напряженно-деформируемого состояния защитных оболочек АЭС на этапе сооружения и эксплуатации // Глобальная ядерная безопасность, 2019. — Т. 30. — № 1. — С. 25—38.

9. *Усов Э. В., Бутов А. А., Чухно В. И., Климонов И. А., Кудашов И. Г., Жданов В. С., Прибатурин Н. А., Мосунова Н. А., Стрижов В. Ф.* Учет пространственных эффектов при расчете тяжелых аварий с помощью интегрального кода ЕВКЛИД/V2 // Атомная энергия, 2019. — Т. 127. — № 1. — С. 3—8.

10. *Колобаева П. В., Мосунова Н. А., Сорокин А. А.* Верификация модуля AEROSOL/LM на экспериментах по горению натрия во влажном воздухе // Атомная энергия, 2019. — Т. 127. — № 6. — С. 319—322.

АНАЛИЗ БЕЗОПАСНОСТИ ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ НАПРАВЛЕНИЯ

Научный руководитель ИБРАЭ РАН

Л. А. Большов

академик РАН
(bolshov@ibrae.ac.ru)

Заведующий отделением

А.Е. Киселев

д.т.н.
(ksv@ibrae.ac.ru)

КЛЮЧЕВЫЕ СПЕЦИАЛИСТЫ:

К. С. Долганов, к.т.н. — численное моделирование запроектных аварий, включая тяжелые аварии с плавлением активной зоны, на АЭС с реакторными установками ВВЭР, РБМК, BWR

В. Н. Семенов, д.ф-м.н. — модели процессов, протекающих на АЭС и в окружающей среде при тяжелых авариях

Д. Ю. Томащик — численное моделирование тяжелых запроектных аварий на АЭС с ВВЭР, создание и программная реализация физико-математических моделей оборудования и систем АЭС в аварийных условиях: активная зона и системы безопасности

М. Ф. Филиппов, к.т.н. — разработка физико-математических моделей переноса радиоактивных веществ в контурах реакторных установок ВВЭР и БН, их поведения под защитной оболочкой, а также программная реализация моделей

Р. В. Чалый — разработка физико-математических моделей и программного обеспечения для анализа проектных, запроектных и тяжелых аварий на АЭС с РУ БН

Т. А. Юдина — водородная пожаровзрывобезопасность АЭС, анализ физических процессов, протекающих в оболочках твэлов и в активной зоне при тяжелых авариях, моделирование переноса радиоактивных веществ в контурах реакторной установки

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ:

1. РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ ИНТЕГРИРОВАННОГО ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА СОКРАТ ДЛЯ ДЕТЕРМИНИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ТЯЖЕЛЫХ АВАРИЙ НА АЭС С РЕАКТОРАМИ ВВЭР И БН
2. ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ТЯЖЕЛЫХ АВАРИЙ НА АЭС С РЕАКТОРАМИ ВВЭР И БН В РАМКАХ ОБОСНОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ АЭС
3. НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ПОДДЕРЖКА РАБОТ ПО АНАЛИЗУ БЕЗОПАСНОСТИ АЭС ПРИ ТЯЖЕЛЫХ АВАРИЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА СОКРАТ, ВКЛЮЧАЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С ЗАРУБЕЖНЫМИ ЗАКАЗЧИКАМИ ПРИ ЭКСПЕРТИЗАХ ДОКУМЕНТАЦИИ ПО КОДУ СОКРАТ И РЕЗУЛЬТАТОВ АНАЛИЗА ТЯЖЕЛЫХ АВАРИЙ
4. УЧАСТИЕ В РОССИЙСКИХ И МЕЖДУНАРОДНЫХ ПРОЕКТАХ ПО ИЗУЧЕНИЮ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ И ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРАХ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ В ПРОЕКТНЫХ И ЗАПРОЕКТНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ

ОСНОВНЫЕ ИТОГИ 2019 ГОДА:

1. Развиты модели теплогидравлики водяного теплоносителя на начальной стадии аварии, окисления и химических взаимодействий материалов активной зоны, генерации и выхода водорода при тяжелых авариях на энергоблоках с ВВЭР в целях подготовки программы для ЭВМ СОКРАТ-В1/В2 к аттестации в Ростехнадзоре:

- Выполнен комплекс работ по совершенствованию версии **СОКРАТ-В1/В2** и ее дополнительной валидации в части моделирования выкипания теплоносителя в а.з., кризиса теплообмена, повторного залива активной зоны, высокотемпературного окисления оболочек твэлов, термомеханики оболочек твэлов, кросс-верификации моделей точечной кинетики с аттестованными программами для ЭВМ.

2. Выполнен **анализ физических процессов** образования, выхода, химического взаимодействия и переноса продуктов деления ядерного топлива в активной зоне, реакторной установке и устройстве локализации расплава на энергоблоках с ВВЭР:

- Выполнена модернизация и валидация версии программы для ЭВМ **СОКРАТ/В3,** выпущен Отчет о верификации СОКРАТ/В3 в соответствии с новыми требованиями Ростехнадзора, современными мировыми стандартами и с учетом замечаний зарубежных заказчиков (Венгрия, Финляндия). Разработан Аттестационный паспорт. Программа для ЭВМ СОКРАТ/В3 депонирована в Ростехнадзоре. Отчет о верификации представлен для экспертизы в Ростехнадзор.

3. Расширены возможности практического применения программы для ЭВМ СОКРАТ-БН:

- Программа для ЭВМ СОКРАТ-БН/В2 **аттестована для задач моделирования запроектных аварий**, включая аварии с плавлением топлива, на РУ с оксидным топливом и натриевым теплоносителем. Получен Аттестационный паспорт № 472 от 20.11.2019.
- Выполнен **расчетный анализ** протекания аварии, связанной с потерей системного и надежного электроснабжения с отказом всех средств воздействия на реактивность (ULOF) **для РУ БН-1200М** с применением аттестованной программы. Данные по выходу радиоактивных веществ в окружающую среду были применены для оценки радиационной обстановки вокруг проектируемой АЭС с РУ БН-1200.

4. Выполнены **детерминистические расчеты тяжелых аварий** в поддержку вероятностного анализа безопасности второго уровня для АЭС «Аккую» (заказчик АО «Атомэнергопроект»).

5. Разработана совместно с НТЦ ЯРБ **методика по анализу неопределенностей расчетов тяжелых аварий** и, в рамках подготовки Руководства по безопасности «Рекомендации по оценке погрешностей и неопределенностей результатов расчетных анализов безопасности атомных станций» в части тяжелых аварий, продемонстрировано ее практическое использование на примере численного анализа выхода водорода во внутрикорпусной фазе тяжелой аварии «большая течь» на АЭС с ВВЭР-1000/В-320. Результаты работы включены в проект Руководства по безопасности.

6. Выполнен **расчетный анализ возможных доз и радиологических рисков для населения**, обусловленных атмосферными выбросами радиоактивных веществ при нормальной эксплуатации и в случае аварийных ситуаций на **РУ БРЕСТ-ОД-300:**

- Для ряда сценариев с кратковременным выбросом с помощью специальной опции кода **РОМ** проведен дополнительный расчет, предполагающий, что перенос радиоактивных веществ происходит в наиболее неблагоприятных метеорологических условиях для каждой точки. Рассчитывались параметры радиационной обстановки, входящие в критерий принятия решений по защите населения. Для всех исследованных сценариев установлено, что даже при применении заведомо консервативного подхода расчетные дозы облучения таковы, что срочных мер по защите населения не требуется.

7. Выполнен комплекс работ в рамках международных проектов:

- в рамках проекта **АЯЭ ОЭСР ARC-F** выполнена оценка и демонстрация прогнозных возможностей программы для ЭВМ СОКРАТ/В3 по моделированию протекания тяжелых аварий на основе данных с энергоблоков АЭС «Фукусима Дайичи». При помощи программы для ЭВМ СОКРАТ/В3 получены **уточненные результаты расчетов тяжелой аварии на энергоблоке № 1 АЭС «Фукусима Дайичи»** с учетом новых данных обследования энергоблока японскими специалистами;

- в проекте ACTOF (МАГАТЭ), посвященном анализу поведения аварийно-устойчивого топлива в условиях проектных и запроектных аварий, включая тяжелые аварии, подготовлены итоговые материалы для публикации в отчете серии **TECDOC**, выполнен дополнительный расчетный анализ результатов эксперимента **QUENCH-19** с оболочками твэлов из сплава **FeCrAl** и показана важность дальнейших экспериментальных исследований кинетики окисления этого сплава при температурах, близких к температуре плавления;
- подготовлены материалы с результатами моделирования интегрального эксперимента на стенде **PERSEO** с помощью программы для ЭВМ COKPAT-B1/B2 для включения в отчет АЯЭ ОЭСР по проекту PERSEO, целью которого являлось формулирование требований к пассивным системам безопасности в составе РУ поколения 3+ и выше, а также определение критериев для оценки надежности работы таких систем и их влияния на безопасность АЭС. Полученные ИБРАЭ результаты — единственные среди участников проекта, показавшие отличное совпадение с измерениями мощности теплообмена (основной характеристики системы) как в номинальном, так и в переходных режимах работы экспериментальной установки, причем они были получены с помощью имеющихся теплогидравлических моделей COKPAT-B1/B2;
- подготовлены публикации, завершающие работы в рамках проекта **МАГАТЭ FUMAC** (2014—2018 гг.), направленного на улучшение понимания и повышения безопасности поведения топливных стержней при проектных авариях с течью теплоносителя, а также на ранней фазе запроектных аварий. Хорошие прогнозные возможности программы для ЭВМ COKPAT-B1/B2 по моделированию ранней фазы разрушения активной зоны в ходе тяжелой аварии подтверждены путем сравнения результатов расчетов с данными эксперимента **CORA-15**, а также соответствующей кросс-верификации с кодом **ATHLET-CD** (GRS, Германия). Качество моделирования поведения твэлов на начальной стадии развития тяжелой аварии с потерей теплоносителя (до перехода в тяжелую стадию) проверялось на интегральных экспериментах **IFA-650.9**, -10 и -11 с топливом высокого выгорания, выполненных на исследовательском реакторе Халден. Хорошее соответствие расчетных и измеренных данных позволило использовать теплогидравлические условия, рассчитанные в программе для ЭВМ COKPAT-B1/B2, в качестве граничных условий для бенчмарков, организованных на основе экспериментов IFA-650.9, -10 и -11 для топливных кодов.

8. Совместно с **ЦНТП ИБРАЭ РАН** завершен третий этап проекта по разработке программного модуля расчетно-прогностического комплекса «В» в рамках выполнения НИР «Создание практической методологии комплексного обоснования безопасности объектов наследия, пунктов захоронения радиоактивных отходов, включая разработку и внедрение системы кодов и расчетно-прогностических комплексов. Этап 2017—2019 гг.». В рамках этапа проведена **валидация модуля ВЕНТИЛЯЦИЯ**.

9. Участие в международных конференциях:

- **Техническое совещание МАГАТЭ**, посвященное феноменологии и методам моделирования тяжелых аварий в бассейнах выдержки отработанного топлива водоохлаждаемых реакторов (2—5 сентября 2019 года, Вена, Австрия). ИБРАЭ РАН был представлен доклад «Modeling PARAMETER-SF4 experiment with SOCRAT/V1 code» (авторы: К. С. Долганов, А. Е. Киселев, Д. Ю. Томащик, Т. А. Юдина). По результатам проведенного совещания будет подготовлен и издан Технический отчет МАГАТЭ (TECDOC), который представит общественности согласованный обзор усилий в области анализа аварий в бассейнах выдержки.
- **Второе и Третье совещания участников проекта АЯЭ ОЭСР**, посвященные подготовке отчета «Status report on thermal-hydraulic passive systems design and safety assessment» по требованиям к пассивным системам безопасности используемых или проектируемых РУ поколения 3+ и выше, критериям оценки надежности их работы и оценке безопасности АЭС при их использовании. В отчете приведены данные экспериментального проекта PERSEO с участием представителей 8 стран (Россия, США, Италия, Германия, Южная Корея и др.) по оценке адекватности расчетного моделирования протекающих процессов с использованием 9 различных расчетных кодов.
- **Первое координационное совещание по проекту «Улучшение положения дел в методологии оценки неопределенностей и чувствительности для анализа тяжелых аварий в реакторах с водяным охлаждением»** (Advancing the State-of-Practice in Uncertainty and Sensitivity Methodologies for Severe Accident Analysis in Water-Cooled Reactors CRPI31033 (МАГАТЭ)).

На совещании был представлен доклад, в котором суммирован опыт ИБРАЭ РАН в области анализа неопределенностей тяжелых аварий и приведены предложения ИБРАЭ РАН по постановке задач в рамках данного проекта.

- **Одиннадцатая международная научно-техническая конференция «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР»** (21—24 мая 2019 г., АО ОКБ «Гидропресс»). ИБРАЭ РАН представлены доклады «Расширенный анализ событий и последствий тяжелой аварии на энергоблоке 1 АЭС «Фукусима Дайичи» при помощи кода COKPAT/B3» и «Усовершенствование модели нуклидной кинетики в составе интегрального кода COKPAT/B3».
- **Подготовительное совещание по проекту OECD-NEA** «Исследования рисков горения водорода / монооксида углерода и мер по их снижению, а также вопросы определения источников для поддержки анализа и дальнейшего совершенствования мер по управлению тяжелыми авариями» (26 июня 2019 г., Франкфурт, Германия). Проект OECD-NEA THAI-4 включает в себя исследования: работоспособности рекомбинаторов водорода; физических процессов воспламенения и распространения пламени в смесях H_2+CO в условиях низкого содержания кислорода; поведения йода при тяжелых авариях; уноса продуктов деления с поверхностей осаждения в условиях горения водорода.
- **Рабочая встреча со специалистами KIT** (27—28 июня 2019 г., Карлсруэ, Германия) в целях налаживания сотрудничества в области расчетно-экспериментальных исследований. В ходе встречи были заслушаны 8 устных докладов, проведена дискуссия за «круглым столом» и организовано посещение экспериментальной площадки. По итогам обсуждений в качестве ближайших действий было обозначено возможное совместное участие в проекте HyTunnel-CS, целью которого является проведение исследований для обеспечения безопасности транспортных средств, работающих на водороде, при прохождении через туннели и замкнутые пространства (подземные парковки). Результаты проекта могут иметь более широкое применение, например, для анализа безопасности в горно-обогатительной отрасли.
- **Стартовое совещание по проекту «Hydrogen SOAR»** и **Международное совещание по водородной безопасности АЭС** (8—13 апреля 2019 г., Париж, Франция). Во время совещания от руководителя экспериментальной программы на установке THAI (Sanjeev Gupta, Becker Technologies, Eschborn) поступило предложение присоединиться к проекту OECD/NEA THAI-4. Проекты THAI проводятся под эгидой OECD/NEA. Эксперименты по проектам OECD/NEA THAI направлены на получение данных высокого пространственного и временного разрешения для моделирования

Рисунок 2.1.10 — Техническое совещание МАГАТЭ, 2—5 сентября 2019 года, Вена

поведения водорода и продуктов деления, в том числе в условиях тяжелых аварий.

- **Первое совещание по анализу результатов обследования контейнментов и реакторных зданий АЭС «Фукусима Дайичи»** (проект ARC-F, 22—23 января 2019 г., АЯЭ ОЭСР, Булонь-Бийанкур, Франция). 24 января там же прошел объединенный семинар АЯЭ по вопросам ликвидации последствий аварии на АЭС «Фукусима Дайичи». В совещании и семинаре принял участие зав. лабораторией ИБРАЭ РАН К. С. Долганов, представивший предложения по составу работ ИБРАЭ в рамках проекта ARC-F (2019—2021 гг.), который является продолжением работ по анализу аварии, выполнявшихся ранее в рамках проектов BSAF (2012—2014 гг.) и BSAF-2 (2015—2019 гг.).

В частности, планируется завершение расчетов аварии на энергоблоках 2 и 3 при помощи кода СОКРАТ/В3 с целью получения радиоактивного выброса и оценки условий для взрыва водорода. С использованием полученного выброса специалистами ЦНТП ИБРАЭ РАН будет выполнено моделирование по коду НОСТРАДАМУС атмосферного переноса и расчет доз в пострадавших областях Японии. Важно, что эти работы будут выполняться с использованием методики, применяемой в ИБРАЭ для детерминистической поддержки ВАБ-2 энергоблоков с ВВЭР. Также планируется дальнейшее расчетное исследование взаимодействия расплав—бетон на энергоблоке 1 с целью уточнения степени абляции бетона расплавом при наличии залива водой сверху.

КЛЮЧЕВЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАБОТ:

1. Evaluation of Loads on the Main Joint of Reactor Pressure Vessel under Hypothetical Severe Accident at VVER-1200 NPP. Kirill S. Dolganov, Vladimir N. Semenov, Arkady Ye. Kiselev, Dmitry Yu. Tomashchik, Nuclear Engineering and Design 353 (2019).

2. Post-test analyses of the CORA-15 bundle test with the system codes ATHLET-CD and SOCRAT. J. Stuckert, H. Austregesilo, Ch. Bals, Th. Hollands, A. Kiselev, D. Tomashchik, T. Yudina, Nuclear Engineering and Design 342 (2019).

3. Анализ и визуализация результатов расчетов интегрального тяжелоаварийного расчетного кода СОКРАТ-БН. Сумароков С. В., Гусев М. В., Кечков А. А., Чалый Р. В., Новосельский Ф. О., Арутюнян А. Р., Информационные технологии в проектировании и производстве, 2019, № 2 (174). С. 12–15.

4. Исследование термомеханического поведения оболочек твэлов ВВЭР с помощью кода СОКРАТ/В1. Тарасов А. Е., Чалый Р. В., Томащик Д. Ю., Долганов К. С., Киселев А. Е., Семишкин В.П., Пантюшин С. И., Быков М. А., ВАНТ Серия: Физика ядерных реакторов, Выпуск 2. 2019.

5. Методика расчета радиационной обстановки при аварийных атмосферных выбросах на АЭС с использованием реальных метеорологических данных. Дзама Д. В., Семенов В. Н., Сороковикова О. С., Фокин А. Л. / Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций, Изд-во: ВИНИТИ РАН. № 3. 2019. С. 36–44.

6. Main findings, remaining uncertainties and lessons learned from the OECD/NEA BSAF project. Pellegrini, M., Herranz, L., Sonnenkalb, M., Lind, T., Maruyama, Y., Gauntt, R., Bixler, N., Morreale, A., Dolganov, K., Sevon, T., Jacquemain, D., Song, J. H., Hoshi, H., Nishi, Y., Mizokami, S., 18th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, NURETH 2019.

7. Overview and outcomes of the OECD/NEA benchmark study of the accident at the Fukushima Daiichi NPS (BSAF) phase II – Results of severe accident analyses for Unit 1. Pellegrini, M., Lind, T., Sonnenkalb, M., Godin-Jacqmin, L., López, C., Dolganov, K., Cousin, F., Tamaki, H., Kim, T. W., Hoshi, H., Andrews, N., Sevon, T., 18th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, NURETH 2019.

8. Комплексный анализ безопасности перспективной реакторной установки БН при авариях. Анфимов А. М., Кирилов И. Н., Кузнецов Д. В., Рыжов Н. И., Фокин А. Л., Чалый Р. В. / Конференция молодых специалистов «Инновации в атомной энергетике» Москва, 01–03 октября 2019 г. Инновации в атомной энергетике. Электронный ресурс. 2019. Изд-во: Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники им. Н. А. Доллежаля.

9. International Atomic Energy Agency, Fuel Modelling in Accident Conditions (FUMAC), IAEA-TECDOC-1889, IAEA, Vienna. 2019.

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЯДЕРНЫХ УСТАНОВКАХ

НОВОСИБИРСКИЙ ФИЛИАЛ ИБРАЭ РАН:

Директор филиала

Н. А. Прибатурин

чл.—кор. РАН

(pribaturin@itp.nsc.ru)

Заведующий отделом

С. И. Лежнин

д.ф.-м.н.

КЛЮЧЕВЫЕ СПЕЦИАЛИСТЫ:

Э. В. Усов, к.т.н. — заведующий лабораторий

В. С. Жданов, к.т.н. — заведующий лабораторией

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ:

1. ОБОСНОВАНИЕ, ПЛАНИРОВАНИЕ И СОПРОВОЖДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ТЕПЛОГИДРАВЛИКЕ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ В РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВКАХ
2. РАСЧЕТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК, В ТОМ ЧИСЛЕ РАЗРАБОТКА КОДОВ ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ АЭС С ПЕРСПЕКТИВНЫМИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯМИ
3. ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПЕРСПЕКТИВНЫХ НЕЙТРОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

ОСНОВНЫЕ ИТОГИ 2019 ГОДА:

1. Совместно со специалистами **ИТ СО РАН** проведены **экспериментальные исследования распределения напряжения трения на поверхности имитатора твэла**, средней осевой и пульсационной скорости течения в канальных промежутках в 7-стержневых и 37-стержневых моделях ТВС, различающихся диаметром стержней и расстоянием между ними. Измерения выполнены для моделей ТВС с диаметрами стержней 9, 10, 15 мм и относительным расстоянием между ними, лежащим в диапазоне 1,2 — 1,45. Общий вид гидродинамического стенда и профиль проходного сечения рабочего участка с установленными дистанционирующими элементами и имитаторами твэлов приведены на рисунке 2.1.11.

Получены **оцененные данные по осевому и аксиальному распределению касательного напряжения трения на поверхности и по периметру стержня** — имитатора твэла, по распределению осевой осредненной и пульсационной скоростей жидкости по сечению ячейки, образованной соседними стержнями — имитаторами твэла в зависимости от диаметра стержня, относительного расстояния между стержнями, числа стержней при ламинарном, переходном и турбулентном режимах течения жидкости в ТВС. Выполнен анализ азимутальной неравномерности распределения напряжения трения на поверхности стержня — имитатора твэла в области, где отсутствует влияние дистанционирующих элементов. На рисунке 2.1.12 показано типичное распределение напряжения трения и пульсации трения вокруг имитатора твэла для одной из моделей ТВС в зависимости от режима течения жидкости.

Анализ и обобщение полученных результатов показывают пути оптимизации ТВС с точки зрения уменьшения гидравлического сопротивления и дополняют матрицу верификации расчетных кодов, в том числе CFD-кодов.

2. Выполнено планирование и обоснование экспериментов и целевых результатов по исследованию устойчивости и измерению колебаний имитатора твэла в потоке ТЖМТ. Течение ТЖМТ через ТВС придает проблеме вибрации твэлов особую важность ввиду того, что плотности теплоносителя и материала оболочки твэла практически совпадают.

Совместно с ИТ СО РАН проведены экспериментальные исследования колебания имитатора твэла при течении водяного теплоносителя и модельного ТЖМТ в кольцевом канале с одним имитатором твэла и в 7-стержневой модели — имитаторе ТВС. Для измерения амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) имитатора твэла при его вибрации использована оригинальная методика, разработанная в ИТ СО РАН. Полу-

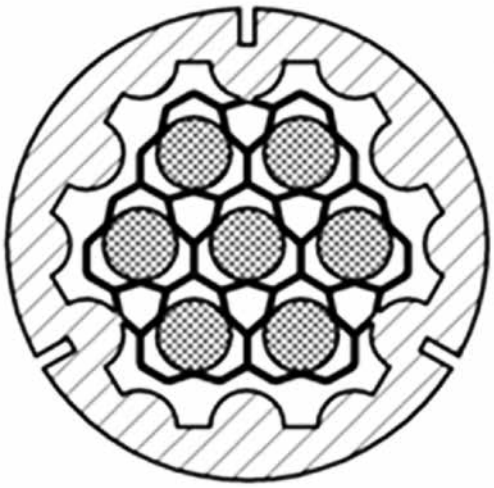


Рисунок 2.1.11 — Общий вид экспериментальной установки и проходного сечения рабочего участка с имитаторами твэлов

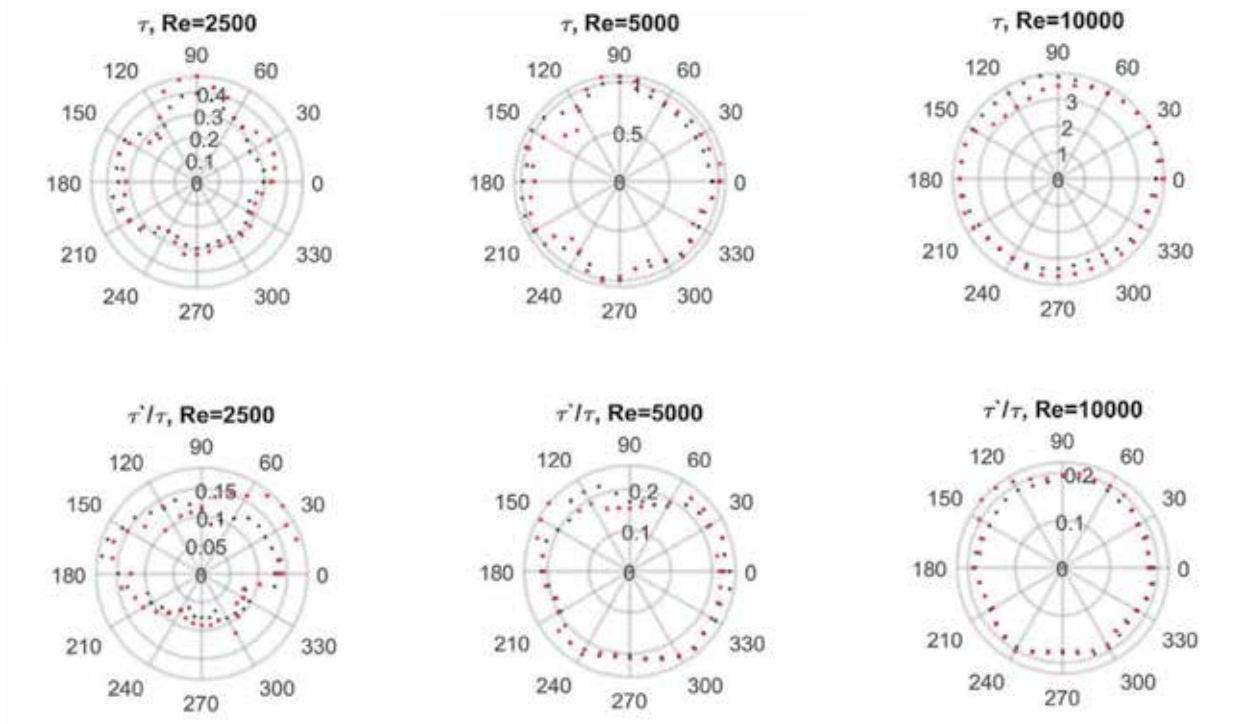


Рисунок 2.1.12 – Типичные азимутальные распределения напряжения трения и их пульсаций на поверхности имитатора твэла

чены данные по вибрационным характеристикам (перемещение оси стержня, спектры колебаний) консольно и шарнирно-закрепленного одиночного стержня — имитатора твэла в потоке теплоносителя при различных длине стержня и расходах теплоносителя и поля распределения скорости течения при обтекании стержня — имитатора твэла продольным потоком жидкости. На рисунке 2.1.13 приведена схема рабочего участка с кольцевым каналом и пример АЧХ колебания одиночного имитатора твэла в зависимости от расхода жидкости через рабочий участок.

3. Проведены методические экспериментальные **исследования по динамике плавления и перемещения расплава имитатора оболочки твэла в ТЖМТ** на лабораторном стенде. Создание условий, моделирующих плавление оболочки имитатора твэла, выполнялось путем нагрева имитатора оболочки на модели топливного столба. Основной акцент в этих исследованиях был сделан на задаче перемещения расплава материала имитатора оболочки, поскольку направление и скорость его перемещения существенно влияют на характер протекания аварийной ситуации.

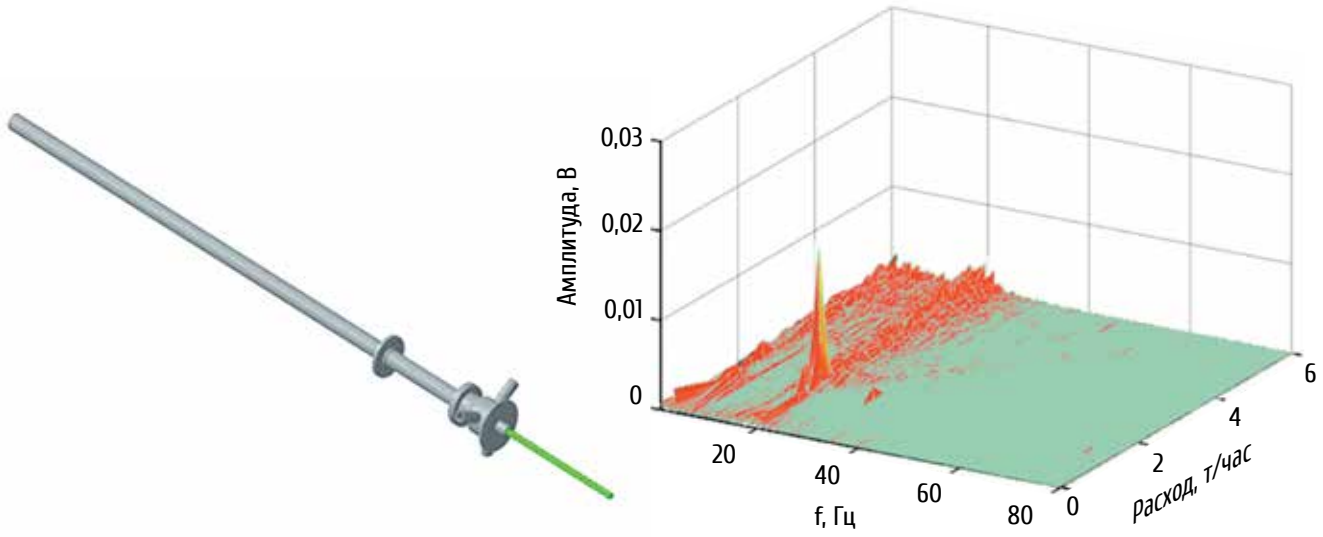
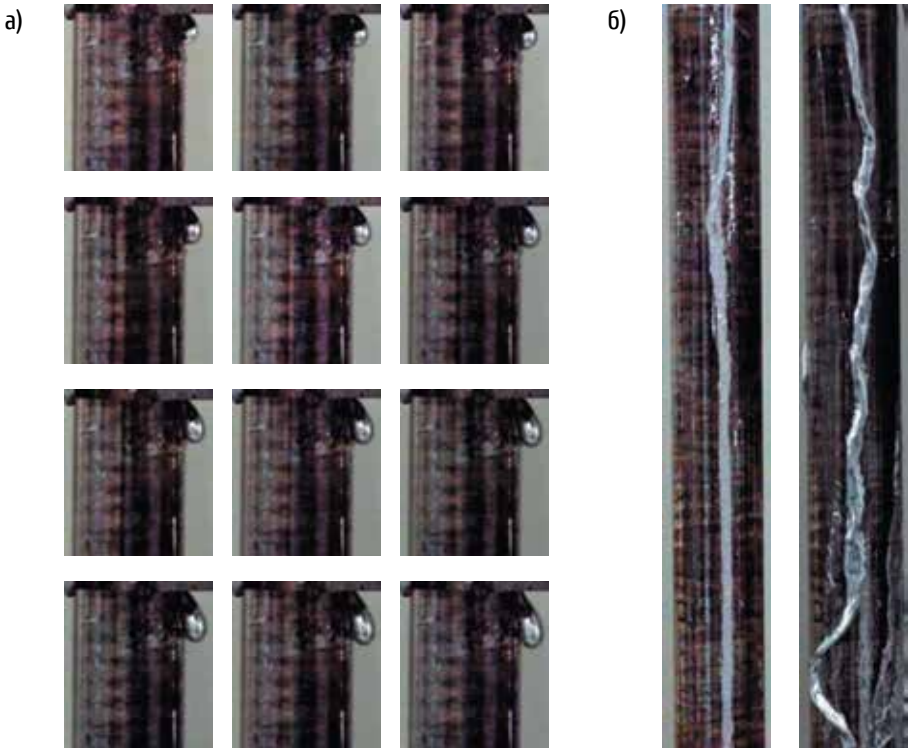


Рисунок 2.1.13 – Схема рабочего участка (слева) и амплитудно-частотная зависимость вибрации стержня (справа)



а) — капельный режим течения

б) — ручейковый режим течения

Рисунок 2.1.14 — Примеры течения расплава оболочки имитатора твэла

Для выполнения методических экспериментов было важно правильно подобрать материал оболочки с учетом его использования в паре со свинцовым теплоносителем. Это должен быть материал, нерастворимый в расплаве свинца, имеющий плотность, близкую к плотности нержавеющей стали, и относительно низкую температуру плавления. Для этих целей был выбран цинк, имеющий температуру плавления 420°C и плотность около точки плавления 6,8 кг/м^3. Эксперименты проводились по двум схемам. По первой схеме изучалось плавление модельной оболочки в неподвижном расплаве свинца с визуализацией движения капель материала оболочки. По второй схеме изучалась эволюция расплава материала модельной оболочки в одиночной ячейке модели — имитатора твэла с дистанционирующей решеткой. Для визуализации плавления слоя металла оболочки была разработана система измерения, основанная на изменении оптических свойств на границе контакта материала оболочки с кварцевой трубкой.

В результате лабораторного моделирования определены эволюция расплава металлической оболочки модельного имитатора твэла в свинцово-висмутовом расплаве и жидком свинце, скорость всплытия фрагментов нержавеющей стали в расплаве свинца.

4. В рамках выполнения проекта РНФ №18-79-10013 «Теоретико-экспериментальное исследование особенностей термического разрушения твэлов быстрого реактора с различными типами топлива» проведено **исследование движения расплавов модельных оболочек, выполненных из разных металлов** (олово, свинец-висмут, цинк, алюминий) по цилиндрической поверхности под действием гравитации и трения с восходящим газовым потоком. Выполнены модельные эксперименты процесса плавления и перемещения имитатора оболочки твэла с непрерывной регистрацией параметров экспериментов: температуры, тепловыделения, потери массы за счет стекания расплава, и видеосъемкой процесса при различных значениях энерговыделения. Показано, что в процессе плавления в верхней обогреваемой части имитатора твэла наблюдается пленочный режим стекания, в холодной необогреваемой — ручейковый. Выявлено, что скорость потери массы ограничена скоростью плавления. В полученном приближении оценено число Рейнольдса. В условиях проведенных экспериментов полученные числа Рейнольдса соответствуют ламинарному режиму стекания. Благодаря предварительной подготовке боковой поверхности некоторых имитаторов твэлов (лужению) удалось организовать три возможных режима перемещения расплава: пленочное, ручейково-капельное и капельное стекание.

На рисунке 2.1.14 приведен пример визуализации движения фрагментов расплавившейся оболочки имитатора твэла по несмачиваемой поверхности.

5. Выполнены работы по коррекции расчетных моделей теплогидравлического модуля **HYDRA-IBRAE/LM** интегрального кода **ЕВКЛИД/V2**. В частности, в теплогидравлический код была интегрирована трехмерная многокомпонентная модель, подобная модели, которая используется в современных мультифизичных тяжелоаварийных кодах, например, в коде **SIMMER-III(IV)**. Внедрение подобной опции позволит проводить улучшенную оценку процессов, сопровождающих разрушение а.з. в реакторах с жидкометаллическим теплоносителем. Для демонстрации работоспособности внедренных моделей была проведена их верификация на основе расчетов аналитических тестов по переносу расплава стали в свинце в трехмерной постановке, радиальному растеканию расплава топлива; проверено сохранение массы в трехмерной постановке при аксиальном течении расплава.

С целью расширения области применения интегрального кода ЕВКЛИД/V2 в тяжелоаварийный модуль SAFR интегрального кода ЕВКЛИД/V2 была интегрирована опция для расчета формирования и выхода продуктов деления (ПД) из бассейна расплава. На основе подробного анализа свойств ПД и их соединений, которые образуются в процессе работы реактора на быстрых нейтронах, предложены расчетные модели выхода продуктов деления из бассейна. Одна из них предназначена для моделирования выхода летучих продуктов деления, присутствующих в бассейне в газообразном виде. Для данных веществ выход из расплава происходит за счет роста и всплытия пузырей. Вторая относится к выходу нелетучих ПД. К нелетучим относятся все элементы и их оксиды с низким давлением насыщенных паров, а также элементы, растворимые в бассейне расплава. Здесь выход из расплава происходит за счет конвективного массопереноса к поверхности расплава и последующего испарения с зеркала расплава. Проведено тестирование моделей на задаче по выходу ПД из расплава топлива.

Для оценки возможности интегрального кода ЕВКЛИД/V2 моделировать процессы, важные с точки зрения безопасности РУ с нитридным топливом, разработана матрица верификации, подготовлены аналитические тесты и проведена систематизация результатов экспериментальных исследований по диссоциации нитридного и СНУП-топлива, выполненных в различных организациях России. В частности, разработана матрица верификации для РУ БРЕСТ-ОД-300 с нитридным топливом. Аналитические тесты включают в себя тесты по проверке корректности решения тепловой задачи в нитридном топливе при отсутствии диссоциации и при ее наличии, по определению скорости образования расплава урана и скорости потери массы, а также по вычислению скорости движения расплава урана. Для верификации интегрального кода ЕВКЛИД/V2 проведено обобщение экспериментальных данных по диссоциации нитридного топлива и создан актуализированный перечень экспериментов. В нем представлены данные, полученные в трех исследовательских центрах: НИЯУ МИФИ, АО «ВНИИНМ имени А. А. Бочвара» и в РФЯЦ-ВНИИТФ. По результатам моделирования экспериментов по диссоциации нитрида урана, проведенных в НИЯУ МИФИ, получена погрешность расчета величины потери массы нитридом урана, равная 10%. По результатам моделирования экспериментов по диссоциации нитридного топлива, прове-

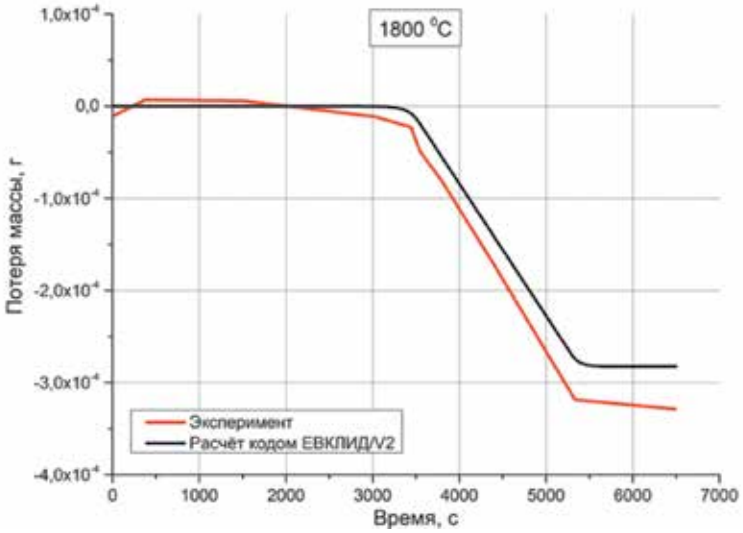


Рисунок 2.1.15 — Сравнение расчетов и экспериментов для температуры 1800°С

денных в АО «ВНИИНМ имени А. А. Бочвара» и в РФЯЦ-ВНИИТФ, для СНУП-топлива получена погрешность расчета потери массы, равная 30%. Пример сравнения расчета и эксперимента приведен на рисунке 2.1.15.

6. В рамках коллаборации с ИЯФ СО РАН продолжались работы по **расчетному моделированию взаимодействия нейтронного потока с опухолевыми клетками**. В частности, на основе кода NMC была разработана расчетная модель бор-нейтрон-захватной терапии (БНЗТ). Данная модель была использована для моделирования экспериментов, проводимых в ИЯФ СО РАН и расчете поглощаемой дозы облучения.

В экспериментах облучались опухолевые клетки и мыши с привитыми внутримозговыми и подкожными опухолями с различными концентрациями бора и без бора. Расчеты позволили определить и сопоставить с экспериментом уровень дозы облучения и степень фокусировки облучения. Выполняемый комплекс работ позволил наблюдать тенденцию к уменьшению или приостановке роста глиобластомы при БНЗТ и продемонстрировал безопасность и эффективность нейтронного пучка, тем самым подтвердив возможность его использования в лечении злокачественных опухолей.

КЛЮЧЕВЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАБОТ:

1. *Усов Э. В., Климонов И. А., Лежнин С. И., Лобанов П. Д.* Исследование особенностей движения расплава оболочки тепловыделяющего элемента по его поверхности во время аварии // Теплофизика и Аэромеханика. 2019. — Т. 26. — № 4. — С. 633—642.

2. *E. V. Usov, I. A. Klimonov, S. I. Lezhnin et al.* Investigation of the melt movement along the fuel pin surface during accidents // Thermophys. Aeromech. 2019. — Vol. 26. — No. 4. — P. 589—597.

3. *E. V. Usov, I. A. Klimonov, S. I. Lezhnin, P. D. Lobanov, V. I. Chukhno.* Numerical modeling of cladding motion over the surface of fuel pin of fast reactor for various fuel // Journal of Engineering Thermophysics. 2019. — Vol. 28. — No. 4. — P. 542—549.

4. *Ivan Kudashov, Eduard Usov, Prof. N. Pribaturin, Vladimir Chuhno, Anton Butov, Ilya Klimonov.* Numerical investigation of the fuel cladding disruption in contact with the molten metallic fuel of a sodium-cooled fast reactor // Proceedings of ICONE-27 27th International Conference on Nuclear Engineering May 19—24, 2019, Ibaraki, Japan. ICONE27-1707.

5. *Pavel Lobanov, Nikolay Pribaturin, Aleksandr Svetonosov, Eduard Usov, Ilya Evdokimenko.* Experimental investigation of liquid metal behavior in gas counter flow // Proceedings of ICONE-27 27th International Conference on Nuclear Engineering May 19—24. 2019, Ibaraki, Japan. ICONE27-2212.

6. *Усов Э. В., Климонов И. А., Бутов А. А.* Численное исследование движения расплава топлива различного типа в твэле // Теплоэнергетика. 2020. № 2. — С. 54—61.

7. *Usov E. V. , Klimonov I. A. , Butov A. A.* Numerical investigation of the molten metallic and oxide fuel relocation along the surface of fuel pin // Thermal Engineering. 2020. — Vol. 67. — No. 2. — P. 122—128.

8. *Бутов А. А., Жданов В. С., Климонов И. А., Кудашов И. Г., Кутлиметов А. Э., Лобанов П. Д., Мосунова Н. А., Сорокин А. А., Стрижов В. Ф., Усов Э. В., Чухно В. И.* Верификация кода ЕВКЛИД/V2 на основе экспериментов с разрушением элементов активной зоны реактора с жидкометаллическим теплоносителем // Теплоэнергетика. 2019. — № 5. — С. 16—24.

9. *Бутов А. А., Жданов В. С., Климонов И. А., Кудашов И. Г., Кутлиметов А. Э., Мосунова Н. А., Сорокин А. А., Стрижов В. Ф., Усов Э. В., Чухно В. И.* Физические модели для расчета разрушений твэла и активной зоны реактора с жидкометаллическим теплоносителем, реализованные в коде ЕВКЛИД/V2 // Теплоэнергетика. 2019, — № 5. — С. 5—15.

10. *Усов Э. В., Бутов А.А., Чухно В.И., Климонов И.А., Кудашов И.Г., Жданов В.С., Прибатурин Н.А., Мосунова Н.А., Стрижов В.Ф.* Особенности алгоритмов кода ЕВКЛИД/V2 для математического моделирования движения расплава во время тяжелой аварии в быстром реакторе // ВАНТ сер. Математическое моделирование физических процессов. 2019. — Вып. 1. — С. 69—77.

11. *Жданов В. С., Мосунова Н. А., Прибатурин Н. А., Стрижов В. Ф., Усов Э. В.* Обзор экспериментальных программ по исследованию плавления активных зон быстрых реакторов в аварийных условиях // ВАНТ. сер.: Ядерно-реакторные константы. 2019. — Вып. 1. — С. 238—249.

12. *Усов Э. В., Бутов А. А., Чухно В. И., Климонов И. А., Кудашов И. Г., Жданов В. С., Прибатурин Н. А., Мосунова Н. А., Стрижов В. Ф.* Учет пространственных эффектов при расчете тяжелых аварий с помощью интегрального кода ЕВКЛИД/V2 // Атомная Энергия. 2019. — Т. 127. — № 1. — С. 3—8.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ УПРАВЛЕНИЯ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ НАПРАВЛЕНИЯ

Заместитель директора

В. Н. Пономарев

д.ф-м.н.

(ponomarev@ibrae.ac.ru)

Заведующий отделом

С. В. Сумароков

(sumarokov@ibrae.ac.ru)

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ:

1. ТЕХНОЛОГИИ УПРАВЛЕНИЯ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ, ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ (PLM-СИСТЕМЫ; PLM – PRODUCT LIFECYCLE MANAGEMENT)
2. МЕТОДОЛОГИЯ ВНЕДРЕНИЯ ЭТИХ СИСТЕМ НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ
3. ПРИМЕНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ КОМПОНЕНТОВ PLM-СИСТЕМ И ИХ ИНТЕГРАЦИЯ МЕЖДУ СОБОЙ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ЕДИНОГО ИНФОРМАЦИОННОГО ПРОСТРАНСТВА ПРЕДПРИЯТИЯ, В ТОМ ЧИСЛЕ:
   - СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ (САПР; CAD – COMPUTER AIDED DESIGN);
   - РАСЧЕТНЫХ КОДОВ (CAE – COMPUTER AIDED ENGINEERING);
   - СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ДАННЫМИ ОБ ИЗДЕЛИИ (PDM – PRODUCT DATA MANAGEMENT);
   - СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ РАСЧЕТНЫМИ ДАННЫМИ (SPDM – SIMULATION PROCESS AND DATA MANAGEMENT)

ОСНОВНЫЕ ИТОГИ 2019 ГОДА:

1. Разработан **макет системы управления данными и процессами расчетных и экспериментальных научных исследований (система «УРАНИЯ»)** для проектного направления «Прорыв». Назначением системы «УРАНИЯ» является:

- автоматизация управления расчетными данными;
- предоставление унифицированных механизмов для проведения расчетов с использованием различных расчетных систем и вычислительных ресурсов;
- информационно-технологическая поддержка проведения экспериментальных исследований;
- поддержка подхода к расчетным исследованиям, ориентированного на непрерывный контроль соблюдения требований, многовариантные оптимизационные расчеты и коллективную работу.

В качестве программной платформы использована система **CML-Bench**. Проведенные в АО «ОКБМ Африкантов» испытания макета системы «УРАНИЯ» подтвердили эффективность реализованных функциональных возможностей и корректность технических решений. В 2020 году запланирован **выпуск первого релиза** системы «УРАНИЯ».

2. Для проектного направления «Прорыв» разработано **техническое задание на расчетные комплексы для решения оптимизационных задач (РКО)**. Назначение расчетных комплексов — решение оптимизационных задач для обеспечения требуемых потребительских характеристик промышленного энергокомплекса (ПЭК) и его элементов и обеспечения их робастности (устойчивости к изменениям условий производства и эксплуатации) при проведении программы НИОКР. Среди них — задачи оптимизации конструкции реакторной установки и ТВС, включая ее теплогидравлические, нейтронно-физические, прочностные и технико-экономические характеристики, оптимизации режимов эксплуатации реакторной установки, а также оптимизации ядерного топливного цикла и системного развития ЯЭ.

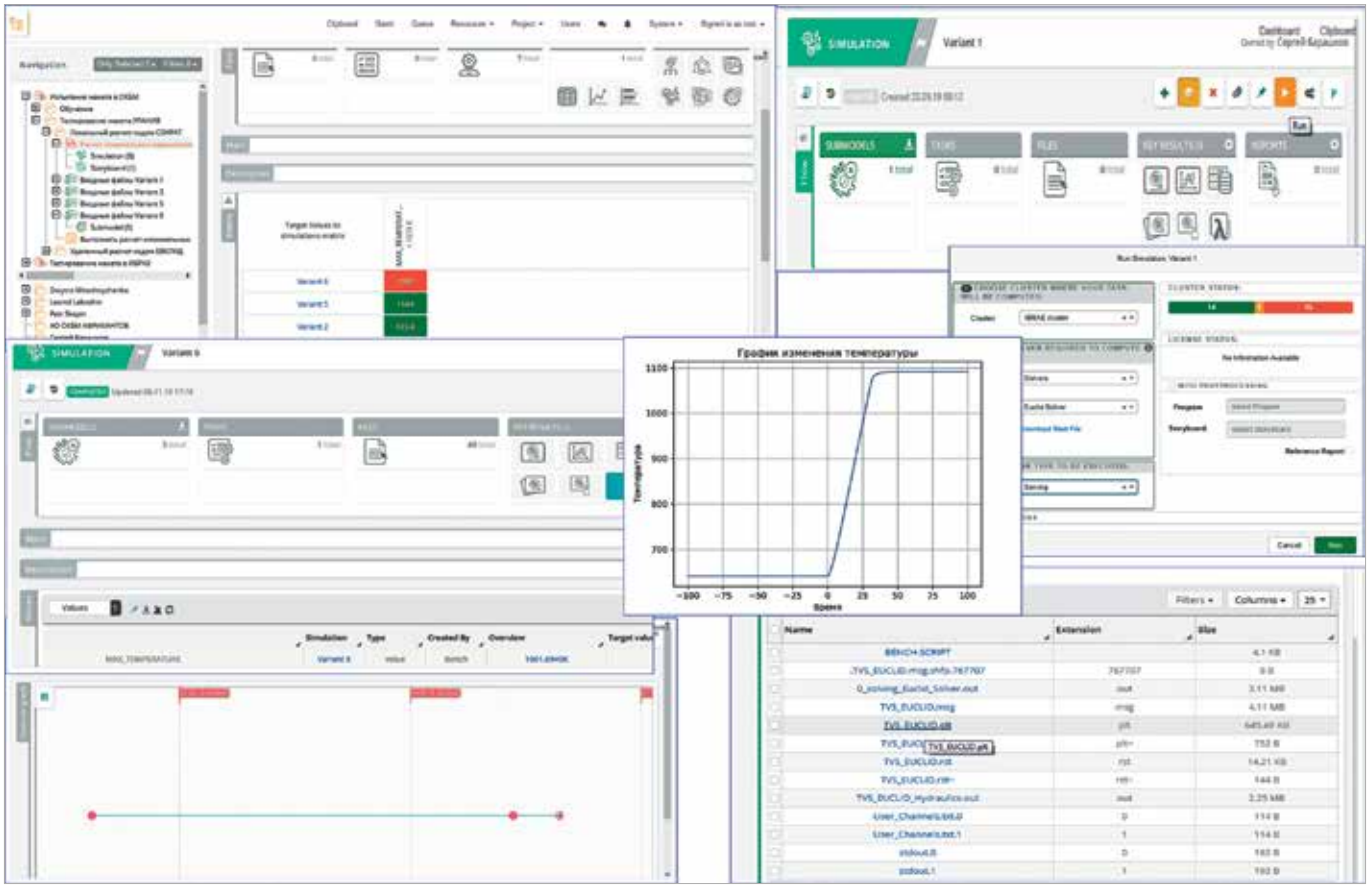


Рисунок 2.1.16 – Интерфейс макета системы «УРАНИЯ»

Применение РКО позволит снизить консерватизм расчетного обоснования базовых параметров безопасности и улучшить технико-экономические характеристики ПЭК в соответствии с требованиями и приоритетами ПН «Прорыв».

Совместно с АО «НИКИЭТ» был проведен «**пилотный проект**» на базе программных комплексов pSeven и STAR-CCM+, где в качестве тестовой задачи была выбрана **оптимизация конструкции соплового ограничителя течи**.

В соответствии с утвержденным ТЗ, начиная с 2020 года будет осуществляться **разработка РКО** для решения соответствующих классов задач.

3. Совместно с Отделом Научного руководителя проектного направления «Прорыв» реализована **полнофункциональная версия цифровой информационной модели** (ЦИМ) активной зоны РБН. ЦИМ позволяет оценить соответствие результатов требованиям, предъявляемым к характеристикам активной зоны РБН проектного направления «Прорыв». Проведена опытная эксплуатация ЦИМ активной зоны на базе РУ БРЕСТ-ОД-300, по итогам которой даны рекомендации по развитию ЦИМ и дальнейшей цифровизации требований к активной зоне РБН.

4. Разработан **конвертер расчетных моделей** из входного файла трехмерного нейтронно-физического кода **JAR-FR** в нейтронно-физический модуль кода **СОКРАТ-БН/В2**. Использование конвертера позволяет:

- значительно сократить время подготовки входных файлов за счет использования ранее разработанных моделей для кода JAR-FR;
- обеспечить расчеты эксплуатационных характеристик РУ и критериев их безопасности на основе единых исходных моделей;
- снизить вероятность ошибок и повысить качество моделирования за счет автоматизации процесса подготовки входной расчетной модели.

Предусмотрено проведение опытной эксплуатации конвертера и переход на его промышленное использование при проведении расчетных обоснований безопасности реакторных установок.

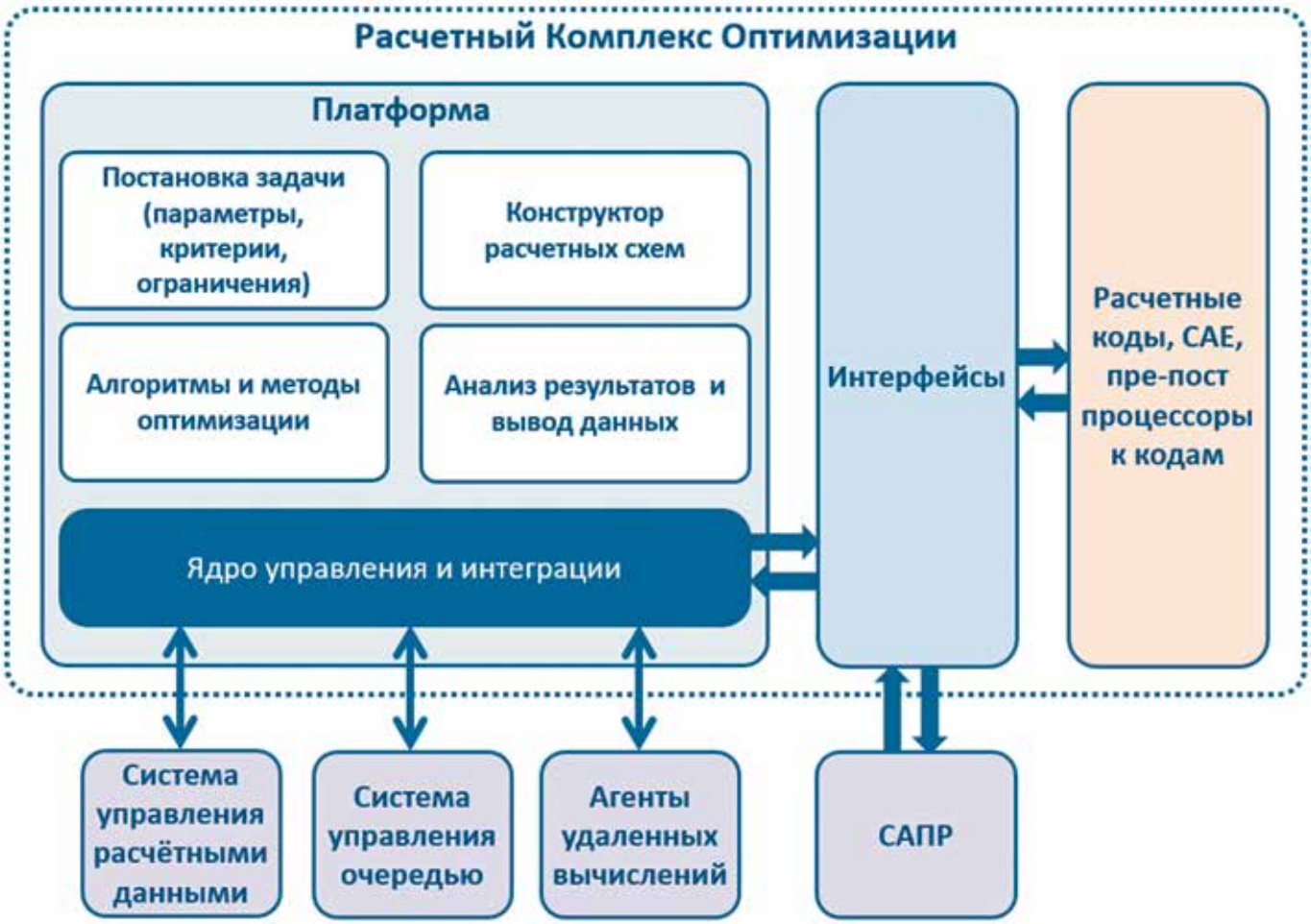


Рисунок 2.1.17 — Общая архитектура расчетного комплекса оптимизации (РКО)

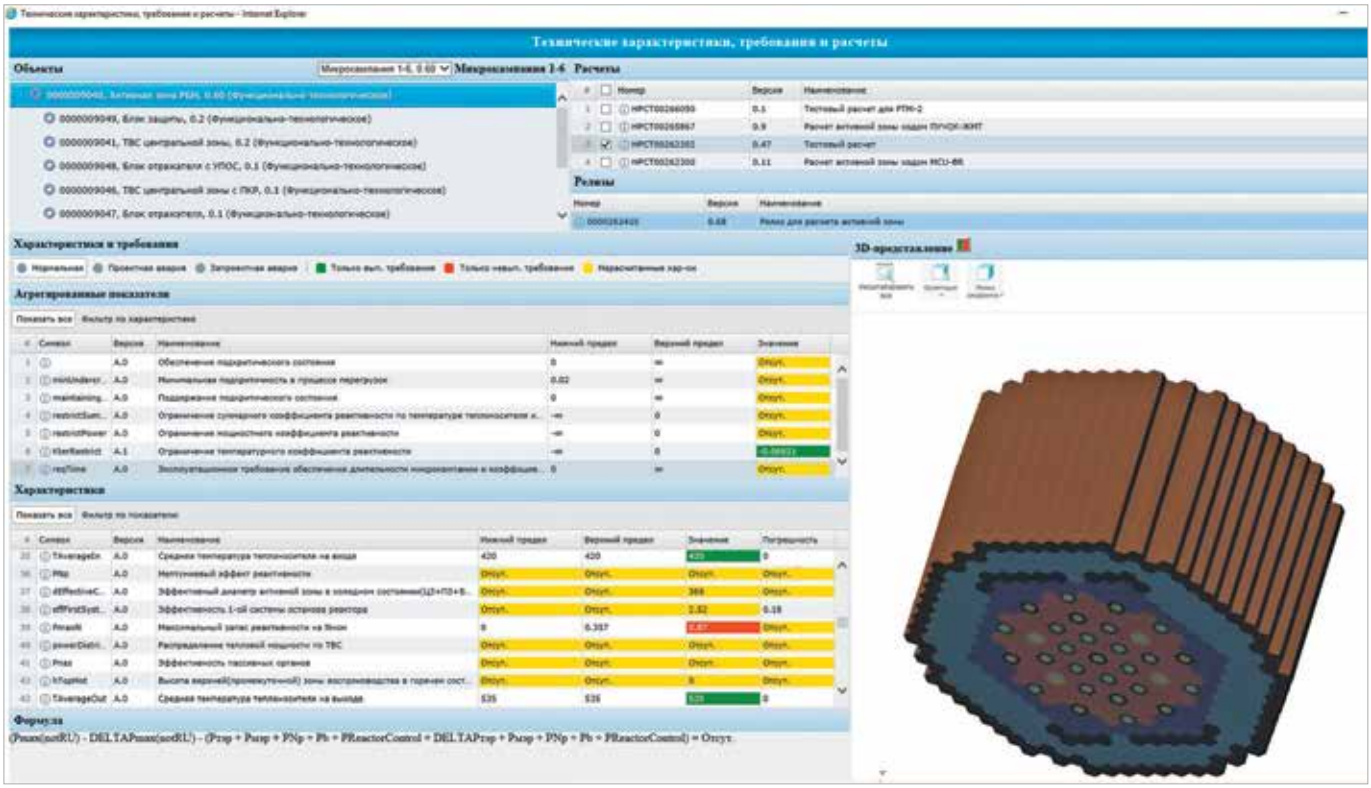


Рисунок 2.1.18 — Интерфейс модуля визуализации ЦИМ активной зоны

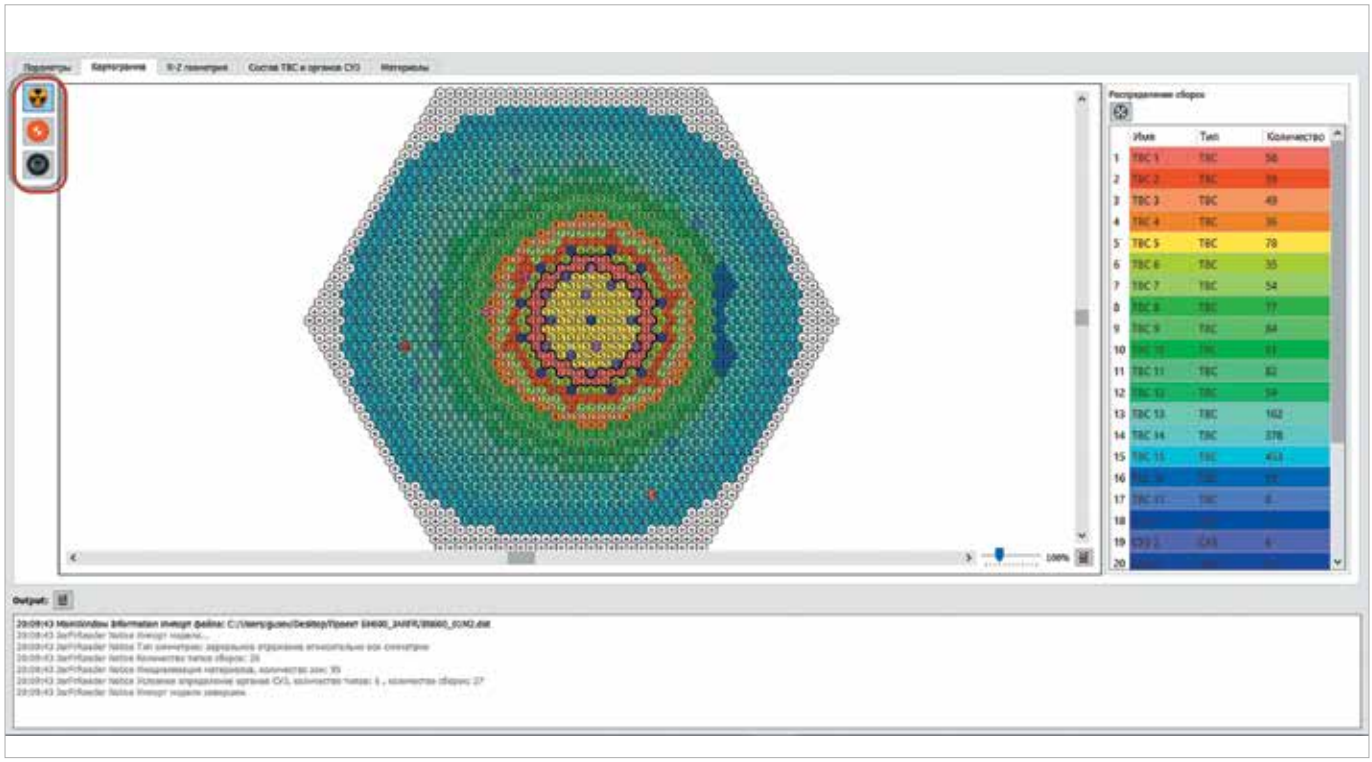


Рисунок 2.1.19 — Интерфейс конвертера JAR-FR — СОКРАТ-БН/В2

2.2. БЕЗОПАСНОСТЬ ЗАВЕРШАЮЩИХ СТАДИЙ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ОБЪЕКТОВ ЯДЕРНОЙ ТЕХНИКИ

БЕЗОПАСНОСТЬ ОБЪЕКТОВ ОБРАЩЕНИЯ С ОЯТ, РАО И ВЫВОД ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЯДЕРНЫХ УСТАНОВОК

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ НАПРАВЛЕНИЯ

Заместитель директора

И. И. Линге

д.т.н.

(linge@ibrae.ac.ru)

Заведующий отделением

С. С. Уткин

д.т.н.

(uss@ibrae.ac.ru)

КЛЮЧЕВЫЕ СПЕЦИАЛИСТЫ:

А. С. Баринов, к.т.н.; **А. А. Самойлов** — прикладные проблемы безопасности ЗСЖЦ

П. А. Блохин, к.т.н.; **Ю. Е. Ванеев**, д.т.н. — радиационные характеристики ОИАЭ

М. В. Ведерникова, к.т.н. — обращение с особыми РАО

В. С. Гупало, д.т.н.; **Б. Т. Кочкин**, д.г.-м.н. — геологические аспекты безопасности

И. В. Капырин, к.ф-м.н. — геомиграционное моделирование

Е. А. Савельева, к.ф.-м.н. — фундаментальные проблемы безопасности пунктов захоронения РАО

В. С. Свительман, к.ф.-м.н. — анализ неопределенностей

С. В. Панченко — радиоэкология

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ:

1. БЕЗОПАСНОСТЬ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ЗАХОРОНЕНИЯ РАО
2. РАЗВИТИЕ НОРМАТИВНО-ПРАВОВОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ОБРАЩЕНИЯ С ОЯТ И РАО
3. РАЗРАБОТКА РАСЧЕТНО-МЕТОДИЧЕСКОГО ИНСТРУМЕНТАРИЯ ОЦЕНКИ БЕЗОПАСНОСТИ ОИАЭ НА ЗАВЕРШАЮЩИХ СТАДИЯХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА, ВКЛЮЧАЯ КОМПЛЕКСНОЕ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, МЕТОДЫ АНАЛИЗА ДАННЫХ И УПРАВЛЕНИЯ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЯМИ
4. ПРАКТИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТОВ ХРАНЕНИЯ ОЯТ И РАО И ВЫВОДА ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОИАЭ
5. МЕЖДУНАРОДНОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО

ОСНОВНЫЕ ИТОГИ 2019 ГОДА ПО НАПРАВЛЕНИЯМ:

1. Безопасность геологического захоронения РАО

Завершена разработка и совместно с ФГУП «НО РАО» начата реализация долговременной научной программы по обоснованию безопасности геологического захоронения РАО (утверждена Директором по государственной политике в области РАО, ОЯТ и ВЭ ЯРОО Госкорпорации «Росатом» 09.01.2019 г.). В 2019 году к работам по реализации научной программы привлечены ИГЕМ РАН, ИФХЭ РАН, Геофизический центр РАН, СПбО ИГЭ РАН, НИТУ «МИСиС», МГУ, Сколтех, АО «Красноярскгеология».

Стартовали полевые работы на выбранном для размещения подземной исследовательской лаборатории (ПИЛ) участке «Енисейский», в ходе которых был произведен отбор проб подземной воды из исследовательских скважин (Рис. 2.2.1), а также проведена проверка работоспособности станций геодинамических наблюдений. Начато детальное планирование работ полевого сезона 2020 года, в число которых включены рекогносцировочные геологические маршруты, геофизические и геохимические исследования, геологоразведочные работы.

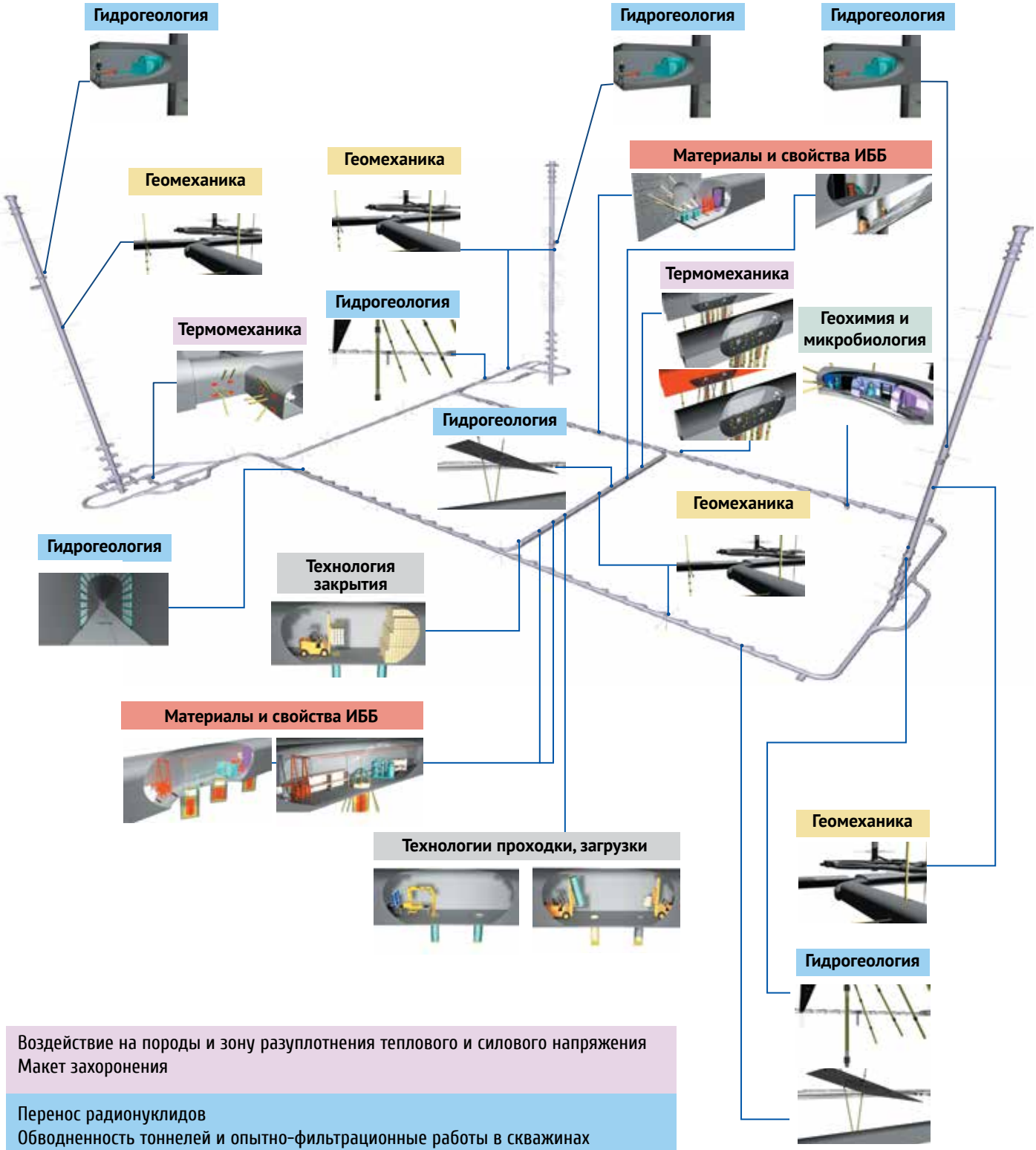
Разработан проект программы научного сопровождения горнопроходческих работ при сооружении горных выработок ПИЛ, начало реализации этого проекта запланировано на 4-й квартал 2021 года. Основные технико-технологические требования согласованы с проектной организацией — Санкт-Петербургским филиалом АО «ФЦНИВТ «СНПО «Элерон» — «ВНИПИЭТ».

Разработан облик ПИЛ с привязкой к основному объему исследований (Рис. 2.2.2). Соответствующие предложения были одобрены на совместном заседании НТС № 5 и НТС № 10 Госкорпорации «Росатом» 10.10.2019. Начаты работы по подготовке технической документации для их практического внедрения.

Впервые создана единая база геологических данных по всем проводившимся в районе размещения ПИЛ исследованиям (бурение глубоких скважин (до 700 м), опытно-фильтрационные работы, геофизические и др. изыскания); на ее основе функционируют геологическая и гидрогеологическая модели (Рис. 2.2.3, 2.2.4).

В октябре 2019 в г. Железногорск (Красноярский край) **подписано Соглашение о научном, образовательном и техническом сотрудни-**

Рисунок 2.2.1 — Работы по отбору проб воды



Воздействие на породы и зону разуплотнения теплового и силового напряжения
Макет захоронения

Перенос радионуклидов
Обводненность тоннелей и опытно-фильтрационные работы в скважинах

Коллоидообразование, газоперенос и скорость эрозии ИББ
Моделирование поведения ИББ в условиях ПГЗРО

Процессы коррозии контейнеров
Химические и биогенные процессы газогенерации

Определение величин и ориентации напряжений в массиве

Отработка основных технологических операций и герметизации тоннелей

Рисунок 2.2.2 — Расположение экспериментальных установок в ПИЛ: предварительное размещение

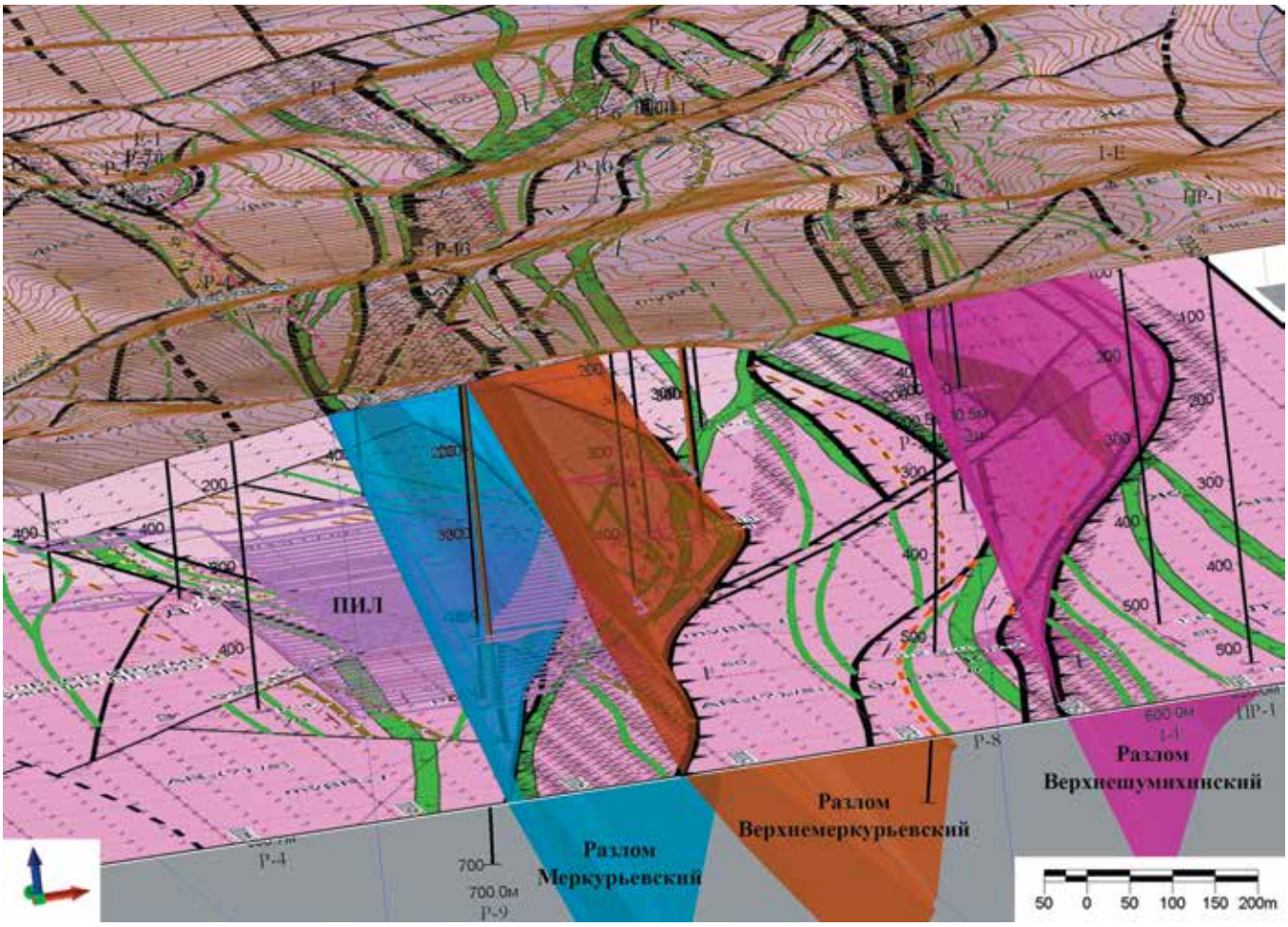


Рисунок 2.2.3 – Трехмерная геологическая модель участка «Енисейский»

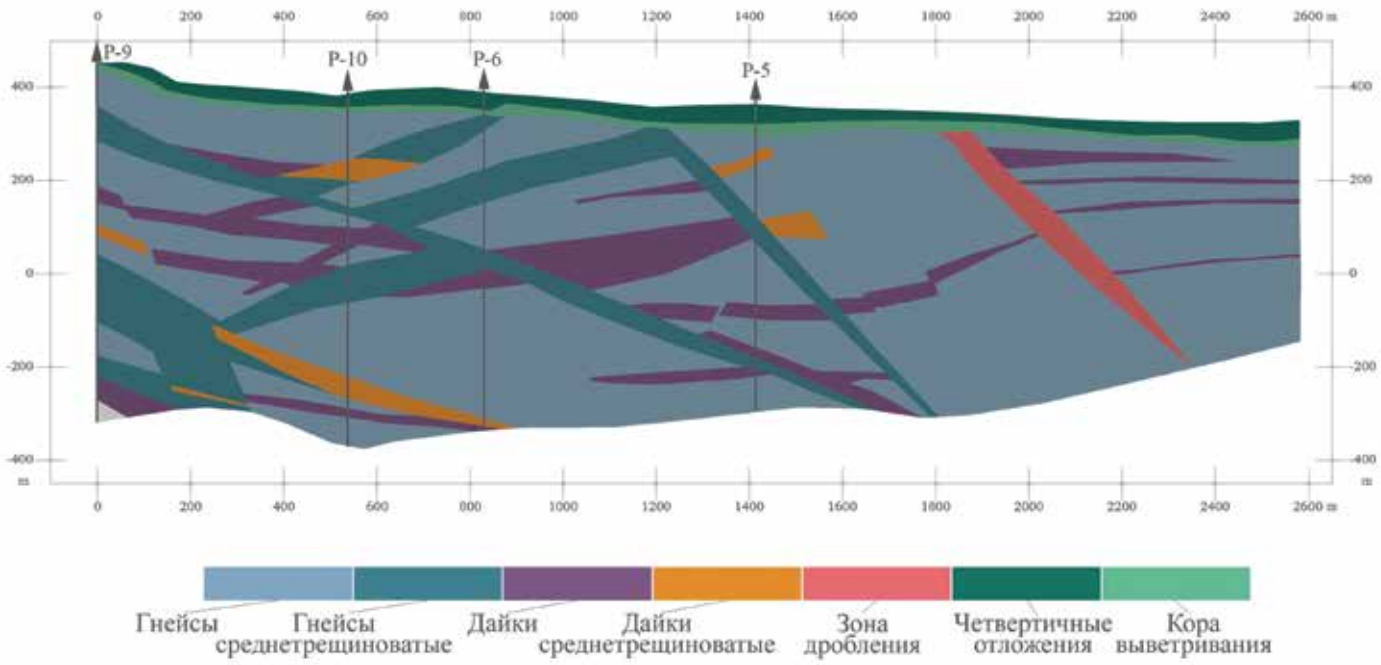


Рисунок 2.2.4 – Профильная модель участка Енисейский по линии скважин P-9, P-10, P-6, P-5

Рисунок 2.2.5 — Подписание соглашения о сотрудничестве между ФГУП «НО РАО», ИБРАЭ РАН и СФУ

честве в области исследований обращения с радиоактивными отходами между ФГУП «НО РАО», ИБРАЭ РАН и «Сибирским федеральным университетом» (СФУ) (Рис. 2.2.5).

2. Развитие нормативно-правового регулирования в области обращения с ОЯТ и РАО

Разработаны предложения и обосновывающие материалы **по внесению изменений в 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». Предложения включают:

- **изменения критериев отнесения РАО к особым РАО** в части исключения не основанных на оценке безопасности ограничений по происхождению отходов и расположению пунктов хранения;
- **изменения классификации РАО для целей захоронения**, в том числе расширение структуры классов и введение дифференцированных критериев классификации по радионуклидам с учетом их радиологической опасности при захоронении.

Разработанные предложения были представлены на профильных научно-технических советах (секция 1 НТС № 10 12.04.2019 и НТС № 10 17.12.2019 г.) Госкорпорации «Росатом» и поддержаны ей для представления материалов на секции № 3 НТС Ростехнадзора (февраль 2020 года). Внесение изменений в ПП 1069 планируется в 2020 году.

Проведена комплексная проработка предложений по включению промышленных отходов с повышенным содержанием радионуклидов в ЕГС РАО. В результате сравнительного анализа различных стратегий обращения с такими отходами показана целесообразность совершенствования нормативно-правового режима обращения с ними в рамках положений Федерального закона от 24 июня 1998 г. № 89-ФЗ «Об отходах производства и потребления». Проведена оценка выдвигавшихся некоторыми специалистами предложений об отнесении этих отходов к радиоактивным отходам, которая продемонстрировала, что такой подход приведет к необоснованному увеличению расходов на обращение с ними, при этом повышения уровня безопасности не произойдет.

Завершена подготовка **предложений по внесению изменений в Федеральный закон от 11.06.2011 г. № 190-ФЗ** «Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации». Изменения были разработаны на основе правоприменительной практики, предложений эксплуатирующих организаций, органов государственного регулирования безопасности, научных организаций. К основным изменениям относятся:

- **корректировка признаков классификации** удаляемых РАО в целях захоронения;
- **усовершенствование правового режима**: эксплуатации пунктов размещения особых радиоактивных отходов; обращения с РАО, образующимися при ВЭ и реабилитации; эксплуатации ПЗРО ОНРАО, расположенных на земельных участках эксплуатирующих организаций;

В настоящий момент проект изменений проходит процедуру внутриотраслевого согласования; направление проекта изменений для рассмотрения в федеральные органы исполнительной власти планируется в 2020 году.

3. Разработка расчетно-методического инструментария оценки безопасности ОИАЭ на завершающих стадиях жизненного цикла

Завершен трехлетний этап работ по созданию системы расчетно-прогностических комплексов (РПК) для решения вопросов обоснования безопасности объектов ядерного наследия, в том числе на этапах их вывода из эксплуатации. В рамках этих работ:

- разработаны **пилотные версии расчетных кодов** по основным аспектам безопасности ОИАЭ на завершающих стадиях их жизненного цикла, а также необходимая сопроводительная документация (руководства пользователя, руководства по моделям, материалы верификационных отчетов). В течение трех лет все РПК будут поданы на аттестацию;
- в 2019 году создано **17 РИД**, опубликовано 25 статей и препринтов; результаты представлены на 40 международных и российских научных конференциях и семинарах;
- получены **акты внедрения** эксплуатирующих, проектных и экспертных организаций на опытную эксплуатацию (АО «ФЦНИВТ «СНПО «Элерон» — «ВНИПИЭТ»; АО «АЭХК»; ГНЦ «НИИАР»; АО «Атомэнергопроект»; АО «ГСПИ»; ФБУ «НТЦ ЯРБ»);
- разработана и подана на аттестацию в Ростехнадзор вторая версия кода GeRa — **GeRa/V2.** Данная версия по сравнению с первой имеет следующие новые модели: переноса в средах с двойной пористостью; теплопереноса и тепловой конвекции; зависимости вязкости раствора от температуры и концентрации примесей; двухфазной фильтрации; сопряженных процессов фильтрации и поверхностного стока;
- разработан расчетный комплекс **КОРИДА** для прогнозирования характеристик ОЯТ и РАО и создаваемых ими радиационных полей. Успешно завершен первый этап верификации модуля нуклидной кинетики **TRACT** на бенчмарк-экспериментах по энерговыделению и реакторных экспериментах по измерению радионуклидных составов ОТВС (НвАЭС). На разработанные расчетные средства оформлено 4 РИД и получено 5 запросов на приобретение от эксплуатирующих организаций, проектных и инжиниринговых организаций атомной отрасли;
- начата разработка программно-технического **комплекса по оценке доз облучения человека и биоты** по всем путям поступления радионуклидов за счет радиоактивного загрязнения водных объектов. Расчетное средство будет соответствовать всем российским и международных требованиям и впервые с таким широким функционалом будет подано на аттестацию в следующем году;
- разрабатывается программное средство **MOUSE**, предназначенное для учета неопределенностей в процессе численного моделирования, в том числе анализа чувствительности модели к ее параметрам и калибровки.

4. Работы по обоснованию безопасности ОИАЭ

4.1. АО «Сибирский химический комбинат»

В рамках оценки различных вариантов обращения с объектами размещения особых РАО на АО «СХК» было выполнено всестороннее рассмотрение возможности использования дополнительных «загрязненных» материалов, в том числе РАО, при консервации пульпохранилищ ПХ-1 и ПХ-2. Проанализированы основные нормативно-правовые акты; выполнена оценка экономического эффекта при совместном размещении накопленных РАО; построены модели ближней и дальней зоны расположения пульпохранилищ, выполнены долгосрочные прогнозы распространения радионуклидов в окружающей среде для различных технологических сценариев консервации пульпохранилищ.

Полученные результаты исследования будут использованы при принятии окончательного решения о совместном размещении РАО, а также лягут в основу проекта консервации пульпохранилищ ПХ-1, ПХ-2.

4.2. ФГУП «РАДОН»

В рамках начатой в 2019 году работы должны быть обоснованы ключевые направления стратегии развития площадки ФГУП «РАДОН», базирующиеся на результатах оценок долговременной безопасности объектов и обоснований отнесения РАО к особым и удаляемым. В 2019 году был выполнен сбор исходных данных, проведен анализ сложившейся системы обращения с РАО на ФГУП «РАДОН», проведе-

на всесторонняя оценка соответствия эксплуатации объектов современным требованиям безопасности. Начата разработка обоснований обращения с накопленными РАО, размещенными в 43-х пунктах хранения ФГУП «РАДОН».

Разработана гидрогеологическая модель площадки (Рисунок 2.2.6). Впервые за всю историю соответствующих исследований учтены следующие факторы:

- трехмерность и латеральная протяженность. Вычисления модели проводятся на специально построенной треугольно-призматической расчетной сетке, состоящей из почти 100 тыс. ячеек. Сетка учитывает особенности геометрии геологической модели. Расчетная область модели имеет размеры: 34x25 км по поверхности, глубина — 300 м;
- данные по 72 глубоким скважинам (>200 метров), пробуренным в период 1976—1977 гг.;
- рассмотрены гидрологические условия территории: модель включает 11 геологических слоев;
- региональный поток подземных вод.

4.3. АО «Ангарский электролизный химический комбинат»

- Впервые реализована методология комплексного применения цифровых информационных моделей и расчетно-прогностических комплексов обоснования безопасности для выработки основных технических решений по выводу из эксплуатации объектов сублиматного завода АО «АЭХК» на основе концептуальной модели площадки. В рамках решения задачи разработаны и апробированы механизмы интерпретации данных КИРО и оптимизации технических решений по обращению с РАО с учетом фактических данных по радиационному загрязнению оборудования и строительных конструкций.

4.4. В рамках научного сопровождения развития ЕГС РАО выполнен комплекс расчетно-аналитических (совместно с ФГУП «ПО «Маяк») и расчетно-экспериментальных (совместно с АО «Радиевый институт им. В. Г. Хлопина») **исследований радионуклидных составов и радиационных характеристик ОЯТ** (ВВЭР-440, ВВЭР-1000 и БН-600) и РАО (материалы ТВЭЛ и ТВС ВВЭР-440, 1000 и БН-600, внутрикорпусных устройств, графитовых кладок РБМК, алюмофосфатное и боросиликатное стекло), позволивших сделать предварительные оценки характеристик РАО 1 и 2 класса для целей оценки безопасности захоронения и предложить организационно-технические мероприятия по оптимизации загрузки будущего ПГЗРО.

Для обоснования дальнейшего обращения с алюмофосфатным стеклом (завод РТ-1 ФГУП «ПО «Маяк») разработан алгоритм расчета его радионуклидного состава, основанный на архивной информации о номенклатуре и рас-

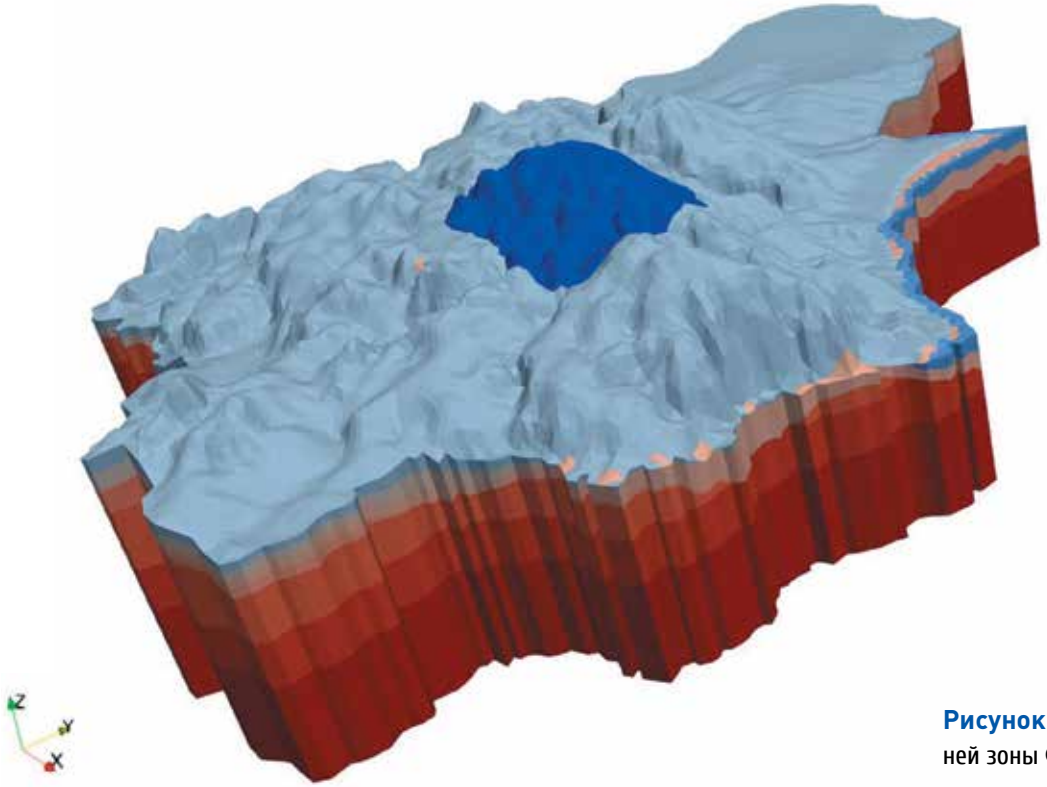


Рисунок 2.2.6 — Модель дальней зоны ФГУП «РАДОН»

считанных составах переработанного ОЯТ. На следующем этапе исследований предполагается верифицировать расчетный алгоритм путем сравнения полученных данных и результатов выборочных измерений радионуклидного состава АФС.

Для обоснования включения в НП-019-15 «Сбор, переработка, хранение и кондиционирование жидких радиоактивных отходов. Требования безопасности» боросиликатного стеклоподобного компаунда проведены расчетные исследования по оценке накопленных дозовых нагрузок на различные образцы боросиликатного стекла (облучение на ускорителе МГЦ-20, включение 4,5% масс. 238Pu и др.).

Разработан расчетный алгоритм управления тепловыми характеристиками боросиликатных стекол (опытно-демонстрационный завод ФГУП «ГХК»), позволяющий путем формирования партий ОТВС ВВЭР-1000 на переработку получать требуемые тепловые характеристики упаковок РАО на заданный момент времени.

Для оценки радионуклидных составов графитовых кладок реакторов РБМК с учетом возможного состава примесных материалов проведена серия расчетов и получены диапазоны значений активности наиболее значимых для оценки долговременной безопасности радионуклидов (14C и 36Cl).

4.5. Продолжены работы по анализу радиационной и экологической обстановки в районах расположения объектов атомной отрасли на основе методов сравнительной оценки рисков разного генезиса. В 2016—2018 гг. исследования были проведены для АО «АЭХК», АО «ГНЦ РФ — ФЭИ», АО «УЭХК», ПАО «МСЗ», АО «ГНЦ — НИИАР», а в 2019 г. — для ФГУП «РФЯЦ — ВНИИЭФ» и ФГУП «ГХК». Показано, что вклад рассмотренных ОИАЭ в техногенное загрязнение окружающей среды и риски потенциального воздействия на здоровье населения на фоне других региональных источников, включая химическую компоненту, находится на пренебрежимо малом уровне. Результаты работ вошли в информационные геоэкологические пакеты предприятий, разрабатываемые ФГБУ «Гидроспецгеология».

5. Международное сотрудничество

5.1. По направлениям деятельности отделения ведется активное международное сотрудничество. В частности, сотрудники отделения приняли участие в качестве российских экспертов в следующих мероприятиях Агентства по ядерной энергии Организации экономического сотрудничества и развития (АЯЭ/ОЭСР, OECD/NEA) и МАГАТЭ:

По тематике обращения с РАО и ОЯТ, в том числе вопросам создания ПГЗРО:

- в Стратегическом брифинге Управляющего комитета АЯЭ/ОЭСР о ходе утилизации ВАО в странах-членах ОЭСР, состоявшемся 18 апреля 2019 года. На брифинге обсуждался статус проектов создания ПГЗРО, в том числе мультинациональный («трансграничный»), включая аспекты лицензирования (на опыте Финляндии) и взаимодействия с общественностью на этапе выбора площадки (на опыте Франции). С. С. Уткиным был представлен доклад «Системный подход к обращению с ВАО в Российской Федерации»;
- в состоявшемся в июне 2019 года в г. Железногорск 3-м совещании международного Кристаллического клуба (Crystalline club), являющегося площадкой для обмена опытом

Рисунок 2.2.7 – Участники Crystalline Club

и информацией между странами и организациями, рассматривающими кристаллические породы в качестве вмещающей среды для глубинного захоронения ВАО или ОЯТ. ИБРАЭ РАН представляли Е. А. Савельева (постоянный член клуба), В. С. Гупало, К. С. Казаков, И. В. Капырин (Рис. 2.2.7). На совещании рассматривались аспекты разработки российской программы исследований в ПИЛ. Также были обсуждены принципиальные аспекты заключенного позднее, в сентябре 2019 года, российско-германского соглашения о сотрудничестве в области обращения с РАО;

- в 52-м совещании Комитета по обращению с радиоактивными отходами (RWMC) и 1-м совещании Комитета по выводу из эксплуатации ядерных установок и управлению ядерным наследием (CDLM) под эгидой АЯЭ/ОЭСР. На совещаниях обсуждались вопросы долгосрочного хранения ОЯТ и РАО, проблемы и неопределенности в области обращения с РАО и ВЭ, риски при ВЭ, вопросы лицензирования проектов, а также экономика этапов подготовки РАО к захоронению. Была анонсирована организация двух новых групп, посвященных робототехническим системам и управлению информацией, данными и знаниями. Сотрудники отделения в дальнейшем были номинированы в качестве участников этой группы. Д. В. Бирюковым был сделан доклад на тему «Обращение с объектами ядерного наследия в Российской Федерации»;
- в состоявшейся 24—28 июня 2019 года международной конференции по обращению с ОЯТ энергетических реакторов (SFM19), посвященной вопросам стратегии, транспортировки, хранения, переработки, захоронения, нормативного регулирования. С докладами в конференции приняли участие П. А. Блохин и Д. В. Бирюков;
- в 21-м заседании Объединенной группы по обоснованию безопасности ПГЗРО (IGSC) Комитета по обращению с РАО АЯЭ/ОЭСР, прошедшем 8—10 октября 2019 года. Страны-участницы представляли информацию о статусе подготовки обоснования долговременной безопасности, в том числе С. С. Уткиным был представлен доклад «Прогресс Российской Федерации в области подготовки обоснования долговременной безопасности пункта глубинного захоронения РАО». Также обсуждались методические вопросы актуализации обоснования долговременной безопасности, международное сотрудничество по вопросам обоснования безопасности и сотрудничество с другими группами под эгидой АЯЭ/ОЭСР (в частности, FSC — Forum on Stakeholder Confidence);
- в консультационном совещании МАГАТЭ «Elicit Milestone Experiments from Underground Research Facility (URF) Information Form», которое состоялось 25—29 ноября 2019 года. Основной рассматривавшийся на совещании вопрос: выбор и обоснование ключевых экспериментов, выполнявшихся в различных ПИЛ, для включения в документ «Compendium of Results of Research, Development and Demonstration Activities Carried out at Underground Research Facilities for Geological Disposal», который МАГАТЭ готовит к изданию в 2020 году. Были отобраны эксперименты, иллюстрирующие основные направления исследований в ПИЛ, необходимые для выполнения обоснования безопасности. Выбор проводился для каждого класса эксперимента и типа вмещающих пород. В совещании принимала участие Е. А. Савельева;

По тематике управления знаниями:

- в международном семинаре «Information, Data and Knowledge Management (IDKM)», состоявшемся 21—26 января 2019 года. На нем освещались как инициативы под эгидой Комитета по обращению с РАО (RWMC) АЯЭ ОЭСР, связанные с управлением информацией, так и накопленные наработки в национальных проектах создания ПГЗРО, а также релевантный опыт из смежных областей. В. С. Свительман была представлена презентация информационной системы PULSE как системы научной поддержки создания ПИЛ в Нижнеканском массиве. Также предварительно обсуждалось создание под эгидой RWMC рабочей группы по управлению информацией, данными и знаниями в проектах захоронения РАО;

По тематике вероятностного анализа безопасности (ВАБ):

- в 20-м совещании рабочей группы по вероятностному анализу безопасности ядерных энергетических установок (WGRISK) 20—22 марта 2019 года. Особое внимание на совещании было уделено систематизации наборов внешних исходных событий при выполнении ВАБ, учету совместного воздействия нескольких исходных событий, вопросам формализации формирования цепочек, вызванных исходными событиями последовательностей. Обсуждение проводилось совместно с рабочей группой по экстремальным событиям (WGEV), которая рассматривает методы мате-

матического моделирования самих процессов, являющихся исходными событиями, а, следовательно, и оценкой их возможных последствий. Также рассматривалась возможность использования для ВАБ баз данных, разрабатываемых в проектах АЯЭ ОЭСР. Техническая секция была посвящена современному состоянию проблемы и урокам, полученным из реального опыта по выполнению ВАБ, в частности, выделения тех событий, которые с высокой вероятностью приводят к разрушению активной зоны и/или значительным выбросам радиоактивных веществ. В совещании участвовала Е. А. Савельева;

По тематике реабилитации загрязненных территорий:

- в межрегиональном семинаре МАГАТЭ по оценке стоимости работ по реабилитации территорий, проводившемся 26—30 августа 2019 года в рамках проекта технического сотрудничества INT/9/183 и включавшем в себя лекции приглашенных специалистов по темам: планирования работ, оценки затрат и международного опыта финансирования проектов по реабилитации, а также концептуального моделирования площадки и общих вопросов радиационной и экологической безопасности населения и персонала при проведении работ. От ИБРАЭ РАН в семинаре участвовал А. А. Аракелян.

5.2. Отдельно следует отметить **развитие российско-германского сотрудничества.** 31 января 2019 года в ИБРАЭ РАН состоялся российско-германский семинар по вопросам обращения с радиоактивными отходами. Достигнутые договоренности о совместной деятельности в области исследований обращения с радиоактивными отходами были закреплены 5—6 сентября 2019 года на 10-м совместном координационном заседании группы экспертов Госкорпорации «Росатом» и Федерального Министерства экономики и энергетики (BMWi) Федеративной Республики Германия, когда было подписано пятистороннее соглашение между ФГУП «НО РАО», ИБРАЭ РАН, Федеральным институтом геологических наук и природных ресурсов (БГР), ООО БГЕ Технолоджи (БГЕ ТЕК) и Обществом по безопасности установок и реакторов Германии (ГРС) (рис. 2.2.8).

Осенью 2020 года запланировано проведение

XI РОССИЙСКОЙ НАУЧНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ «РАДИАЦИОННАЯ ЗАЩИТА И РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ В ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ»,

приуроченной к 75-летию атомной отрасли России

5.3. На осень 2020 года запланировано проведение **XI-й Российской научной конференции «Радиационная защита и радиационная безопасность в ядерных технологиях»,** приуроченной к 75-летию атомной отрасли России. Тематики конференции охватывают широкие отраслевые направления:

Рисунок 2.2.8 Подписание пятистороннего соглашения в области исследований обращения с РАО между ФГУП «НО РАО», ИБРАЭ РАН, Федеральным институтом геологических наук и природных ресурсов Германии (БГР), БГЕ Технолоджи и Обществом по безопасности установок и реакторов Германии (ГРС) 5–6 сентября 2019 г.

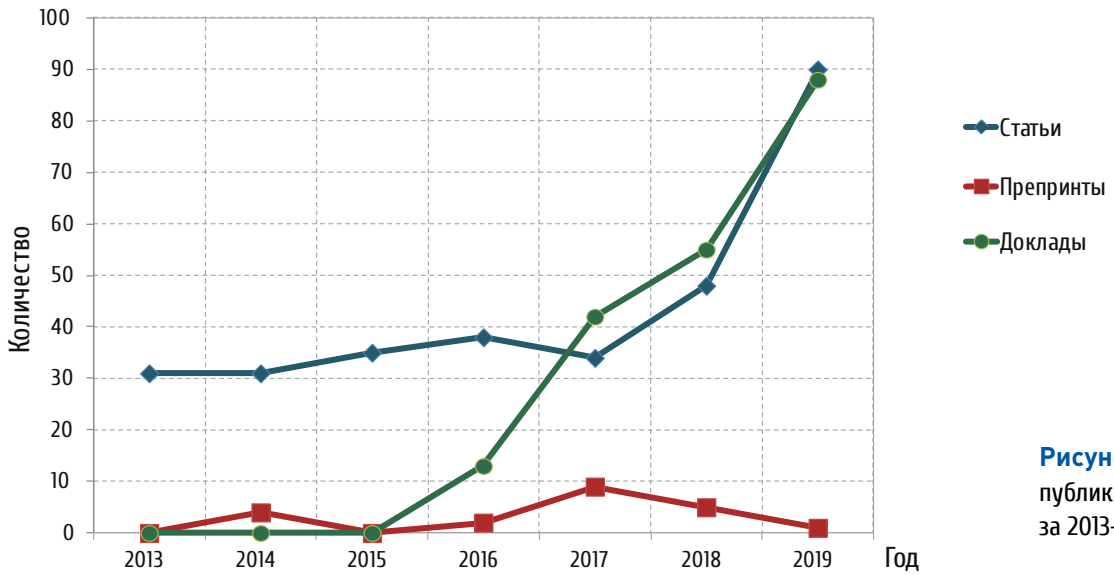


Рисунок 2.2.9 — Динамика публикационной активности за 2013—2019 гг.

- радиационная безопасность;
- расчетные коды для обоснования радиационной защиты и радиационной безопасности;
- безопасность на завершающих стадиях жизненного цикла — обращение с отработавшим ядерным топливом, радиоактивными отходами, безопасное содержание остановленных объектов и их вывод из эксплуатации;
- вопросы радиационной безопасности в ядерной медицине.

Продолжительность конференции составит 4 дня, а ожидаемая численность участников — порядка 500 человек, с представительством иностранных государств — стран ЕврАзЭС.

Организаторами конференции выступят Госкорпорация «Росатом», Российская академия наук, Минобрнауки России и ИБРАЭ РАН. Согласно распорядительным документам Госкорпорации «Росатом», на ИБРАЭ РАН возложено большинство организационных вопросов.

Научный руководитель ИБРАЭ РАН, академик Л. А. Большов утвержден председателем президиума Программного комитета и заместителем председателя Организационного комитета, заместители директора ИБРАЭ РАН И. И. Линге и В. Ф. Стрижов назначены руководителями тематических секций конференции, а также членами президиума Программного комитета, Е. Г. Мамчиц — руководитель Рабочей группы конференции.

5.4. Осуществляется подготовка и сопровождение шестого национального Доклада Российской Федерации о выполнении обязательств, вытекающих из «Объединенной конвенции о безопасности обращения с отработавшим топливом и о безопасности обращения с радиоактивными отходами». Исходя из положительного опыта подготовки предыдущих национальных Докладов Российской Федерации, в 2019 г. совместным решением руководителя Госкорпорации «Росатом» А. Е. Лихачева и главы Ростехнадзора А. В. Алешина подтверждена целесообразность привлечения к работам ИБРАЭ РАН и НТЦ ЯРБ со сроком предоставления национального Доклада в МАГАТЭ — 27 октября 2020 года.

6. Публикация результатов исследований

В 2019 году сохранилась положительная динамика по публикационной активности (рис. 2.2.9).

Продолжена деятельность по получению свидетельств о государственной регистрации Федеральной службы по интеллектуальной собственности (Роспатент). Получено **7 РИД**, из которых 5 созданы в рамках государственных контрактов, 2 — в рамках Государственного задания Минобрнауки РФ.

По 11 РИД были получены **решения о форме правовой охраны Госкорпорации «Росатом»**, а на 2020 год по ним запланировано получение свидетельств из Роспатента.

КЛЮЧЕВЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАБОТ:

1. *Блохин А. И., Блохин П. А. , Ванеев Ю. Е. , Сипачев И. В.* Программный комплекс КОРИДА для прогнозирования радиационных полей с учетом изменений характеристик источников излучения и инженерных барьеров безопасности // Вопросы атомной науки и техники. Серия: математическое моделирование физических процессов. — 2019. № 4. — С. 78—87.

2. *Богатов С. А., Блохин П. А., Козлов П. В., Ремизов М. Б.* Оценочный расчет активности некоторых долгоживущих радионуклидов в составе РАО класса 1 — остеклованных ВАО, образующихся при переработке ОЯТ реакторов ВВЭР // Вопросы радиационной безопасности. — 2019. № 2. — С. 39—46.

3. *Блохин П. А., Дорофеев А. Н., Линге И. И., Меркулов И. А., Сеелев И. Н., Тихомиров Д. В., Уткин С. С., Хаперская А. В.* О возможностях управления характеристиками боросиликатного стекла при переработке ОЯТ ВВЭР-1000 на ОДЦ «ГХК» // Радиоактивные отходы. 2019. № 2(7). — С. 49—57.

4. *Ведерникова М. В., Иванов А. Ю., Линге И. И., Самойлов А. А.* Оптимизация обращения с загрязненными материалами и РАО в пределах промышленных площадок // Радиоактивные отходы. 2019. № 2(7). — С. 6—17.

5. *Самойлов А. А., Ильясов Д. Ф.* К вопросу оценки эффективности деятельности по обращению с радиоактивными отходами // Радиоактивные отходы. 2019. № 3(8). — С. 36—43.

6. *Bagaev D., Grigoriev F., Kapyrin I., Konshin I., Kramarenko V., Plenkin A.* (2019) Improving Parallel Efficiency of a Complex Hydrogeological Problem Simulation in GeRa. In: Voevodin V., Sobolev S. (eds) Supercomputing. RuSCDays 2019. Communications in Computer and Information Science, Vol. 1129, Pp. 265—277 Springer.

7. *Kapyrin I., Konshin I., Kramarenko V., Grigoriev F.* Modeling Groundwater Flow in Unconfined Conditions of Variable Density Solutions in Dual-Porosity Media Using the GeRa Code // Communications in Computer and Information Science. — 2019. — Vol. 965 — Pp. 266—278.

8. *Georgii Neuvazhaev and Alexandr Rastorguev.* Substantiation of the rock massif permeability based on packer tests // E3S Web Conf., 98 (2019) 10004.

9. *Неуважаев Г. Д., Савельева Е. А., Свительман В. С.* Вариационный метод оценки чувствительности миграционной модели // Радиоактивные отходы. — 2019. — № 1(6). — С. 69—76.

10. *Богатов С. А., Неуважаев Г. Д., Коновалов В. Ю.* К вопросу выбора инженерных барьеров пунктов приповерхностного захоронения РАО на примере сценария переполнения // Вопросы радиационной безопасности. — 2019. — № 3 (95). — С. 3—14.

11. *Морозов О. А., Расторгуев А. В., Неуважаев Г. Д.* Оценка состояния геологической среды участка Енисейский (Красноярский край) // Радиоактивные отходы. — 2019. — № 4 (9). — С. 46—62.

12. *Valetov D., Neuvazhaev G., Svitelman V., Saveleva E.* Hybrid Cuckoo Search and Harmony Search Algorithm and Its Modifications for the Calibration of Groundwater Flow Models // Proceedings of the 11th International Joint Conference on Computational Intelligence. : SCITEPRESS — Science and Technology Publications, 2019. — ISBN: 978-989-758-384-1.

ИНФОРМАЦИОННАЯ ПОДДЕРЖКА РАЗРАБОТКИ И РЕАЛИЗАЦИИ ПРОГРАММ В СФЕРЕ ЯРБ

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ НАПРАВЛЕНИЯ

Заместитель директора

И. И. Линге

д.т.н.

(linge@ibrae.ac.ru)

Заведующий отделением

А. Ю. Иванов

(aivanov@ibrae.ac.ru)

КЛЮЧЕВЫЕ СПЕЦИАЛИСТЫ:

И. Л. Абалкина, к.э.н. — долгосрочное планирование в сфере ядерной и радиационной безопасности

В. В. Дроздов — анализ выполнения мероприятий программ

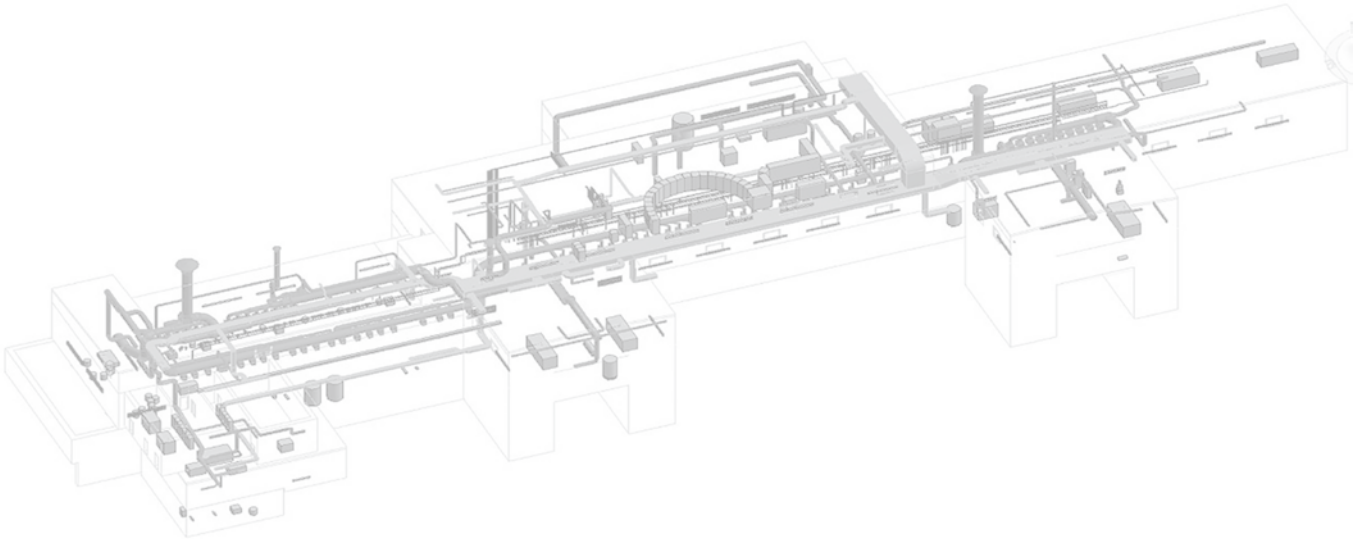
Д. Ф. Ильясов, к.э.н. — экономический анализ завершающих стадий жизненного цикла

С. В. Стрижова, к.э.н., **О. А. Супатаева**, к.ю.н. — нормативно-правовые вопросы обращения с ОЯТ, РАО и ВЭ

А. А. Федьков — информационные системы и базы данных

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ:

1. ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ И ЭКСПЕРТНАЯ ПОДДЕРЖКА ГОСКОРПОРАЦИИ «РОСАТОМ» ПО ВОПРОСАМ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОГРАММ И ПРОЕКТОВ В СФЕРЕ ЗСЖЦ
2. РАЗВИТИЕ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДАННЫХ ОБ ОБЪЕКТАХ И ФОРМИРОВАНИЕ КОМПЛЕКСНОЙ БАЗЫ ЗНАНИЙ ПО ОБЪЕКТАМ ЯДЕРНОГО НАСЛЕДИЯ
3. РАЗВИТИЕ НОРМАТИВНО-ПРАВОВОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ОБРАЩЕНИЯ С ОБЪЕКТАМИ ЯДЕРНОГО НАСЛЕДИЯ



ОСНОВНЫЕ ИТОГИ 2019 ГОДА:

1. Выполнен системный анализ реализуемых отраслевых планов и программ:

Определены основные процессы и задачи, где необходимы **ключевые решения**:

- технические условия на тепловыделение при комплектации партий ОЯТ для переработки на ОДЦ ГХК (2020 год);
- включение в инвестиционную программу ФГУП «НО РАО» пункта захоронения на средних глубинах и пунктов захоронения ОНРАО (2020—2025 гг.);
- распорядительный документ по разработке технологий, исключающих захоронение ЖРО, сроках их внедрения и проработке вопросов закрытия ПГЗ ЖРО (2021—2024 гг.).

Показана **необходимость дополнения** «Стратегии развития ядерной энергетики России до 2050 года и в перспективе на период до 2100 года» **двумя разделами** (приложениями) — «Инфраструктурное обеспечение двухкомпонентной ядерной энергетики России в части обращения с ОЯТ, РАО и ВЭ» и «Экологическое обоснование развития ядерной энергетики России и гуманитарные аспекты».

2. Структурированы и систематизированы в единой информационной системе с интерактивным представлением и постоянным обновлением:

- исходные и отчетные данные по планированию, выполнению и результатам реализации ФЦП ЯРБ-2 за период 2016—2019 гг.;
- данные об объектах ядерного наследия (более 100 характеристик) по итогам проведенных пилотных проектов, включающих идентификацию, финансово- и планово-экономический анализ, технологический и операционный аудит эффективности.

3. Разработаны методические указания и рекомендации по проведению пилотных проектов, собраны «типовые инициативы» для повышения эффективности, верифицированные на организациях отрасли. Разработана динамическая финансово-экономическая модель планирования затрат на обеспечение безопасности и вывода из эксплуатации всех объектов ядерного наследия в контуре управления Госкорпорации «Росатом» для целей обоснования планирования финансовых потоков и оптимизации стратегий распределения ресурсов.

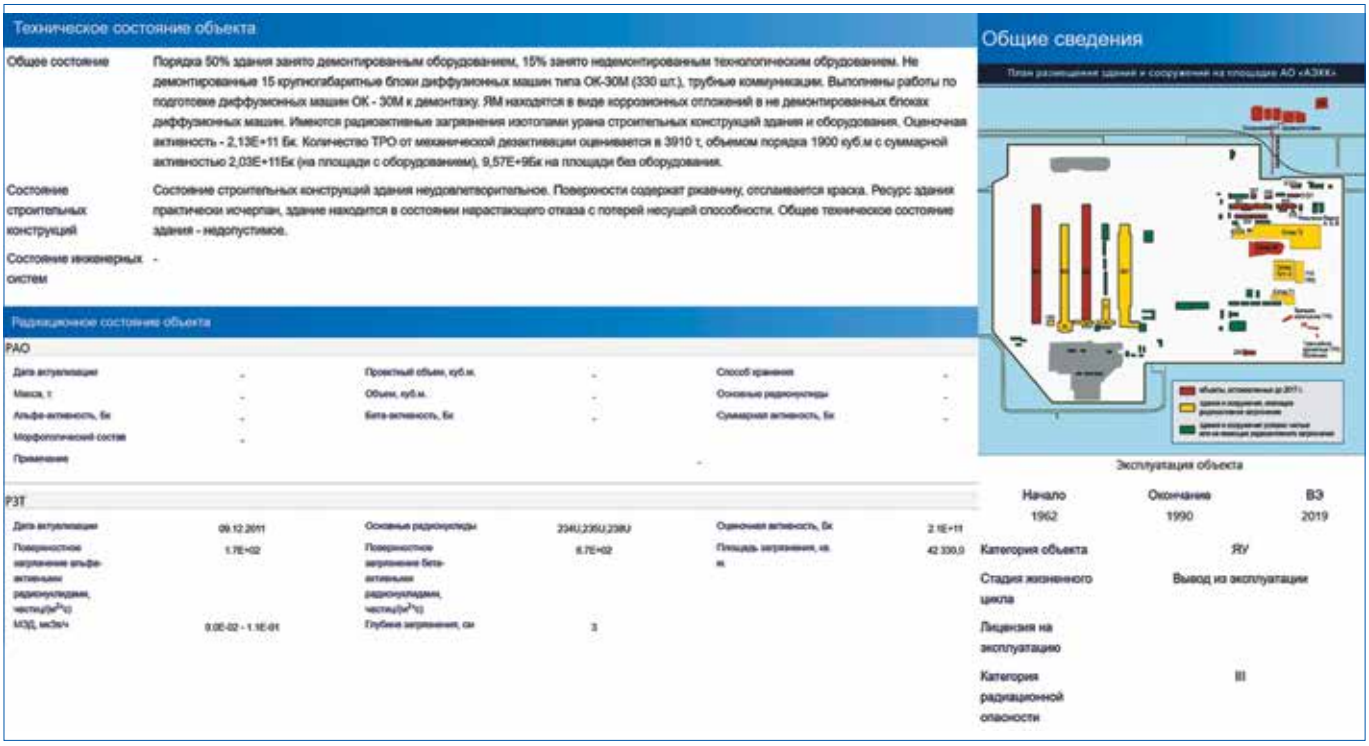


Рисунок 2.2.10 – Форма предоставления актуализированных сводных данных об объектах

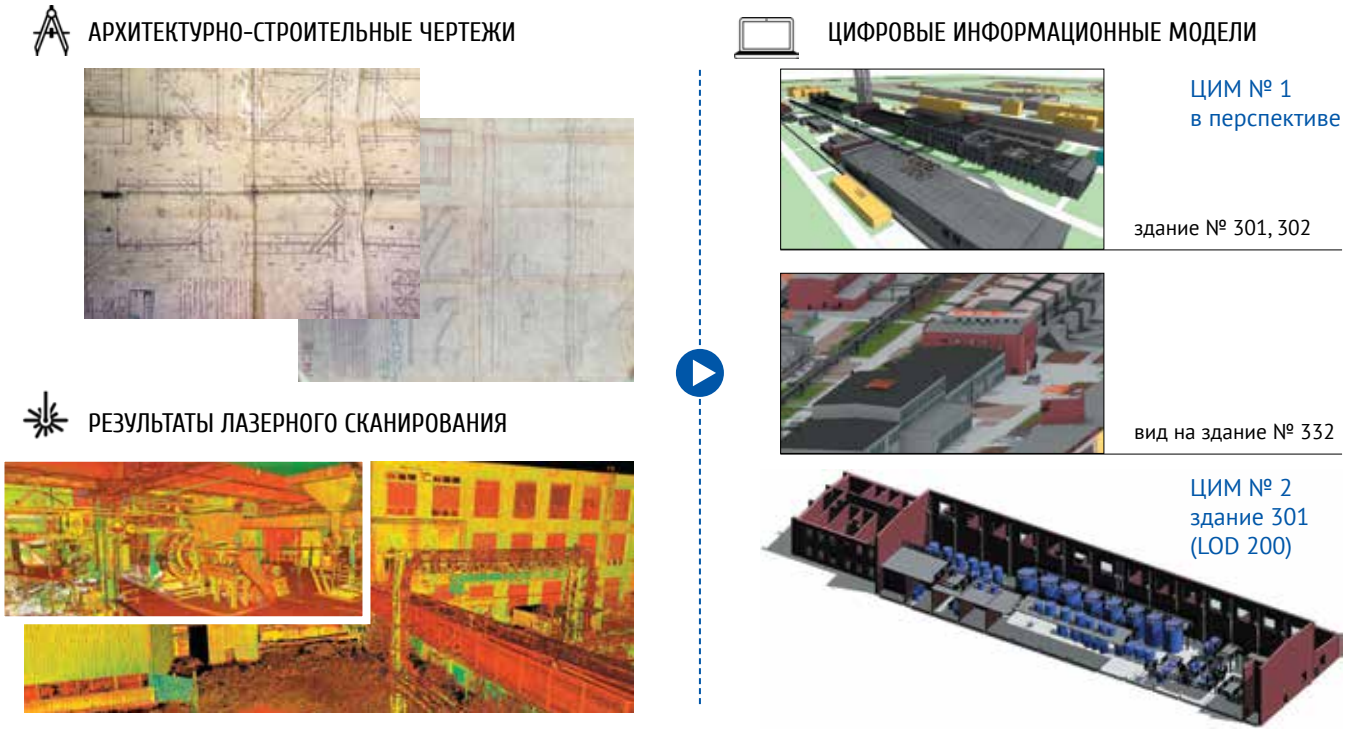


Рисунок 2.2.11 — Разработка цифровых информационных моделей (на примере АО «АЭХК»)

4. Сформировано и оснащено новое подразделение по созданию цифровых двойников промышленных площадок, планируемых к выводу из эксплуатации, с целью создания информационной основы для выработки долгосрочных стратегий и проектов по выводу из эксплуатации. На основе проектной документации и высокоточных методов лазерного сканирования развернуты работы по пилотным площадкам — ФГУП «РАДОН» и АО «АЭХК».

5. Разработан проект федерального закона «О ядерном наследии...», а также пакет обосновывающих материалов, **включая финансово-экономическое обоснование**.

В законопроекте определено понятие объектов ядерного наследия, критерии отнесения к объектам ядерного наследия и предусмотрены современные механизмы эффективного решения накопленных проблем.

КЛЮЧЕВЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАБОТ:

1. *Большов Л. А., Линге И. И.* О согласовании этапов развития атомного энергопромышленного комплекса и системы обращения с РАО // Радиоактивные отходы. — 2019. — №. 3. — С. 14—27.

2. *Большов Л. А., Линге И. И.* Стратегия развития ядерной энергетики России и вопросы экологии // Атомная энергия. — 2019. — Т. 127. — №. 6. — С. 303—309.

3. *Гиневец Е. В., Тихонова А. А., Дорофеев А. Н., Иванов А. Ю., Александрова Т. А., Дроздов В. В.* Информационное обеспечение управления работами по обращению с РАО в рамках ФЦП ЯРБ-2 // Радиоактивные отходы. — 2019. — № 3 (8). — С. 28—35. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-3-28-35.

4. *Ильясов Д. Ф., Иванов А. Ю., Приходько А. В.* К вопросу влияния положений действующих нормативных правовых актов на уровень операционных и эксплуатационных затрат на остановленных ядерно- и радиационно опасных объектах наследия // Экономика природопользования. — 2019. — №. 5. — С. 104—118.

5. *Ильясов Д. Ф., Кузнецова Е. О.* Оценка эффективности мероприятий по повышению безопасности объектов использования атомной энергии // Известия РАН. Энергетика. —2019. — № 5. — С. 111—121.

6. *Лужецкий А. В., Невров Ю. В., Ведерникова М. В., Иванов А. Ю., Линге Ин. И., Неуважаев Г. Д., Савельева Е. А., Шпиньков В. И., Понизов А. В.* О создании интегральной информационной модели для определения стратегии развития промышленного комплекса по обращению с радиоактивными отходами ФГУП «РАДОН» // Радиоактивные отходы. —2020. — № 1 (10). — С. 101—112.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОБЛЕМ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТОВ АТОМНОГО ФЛОТА, АСММ И РАДИАЦИОННО ОПАСНЫХ ОБЪЕКТОВ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ НАПРАВЛЕНИЯ

Советник РАН

А. А. Саркисов

академик РАН

(sarkisov@ibrae.ac.ru)

Заместитель директора

С. В. Антипов

д.т.н

(santipov@ibrae.ac.ru)

КЛЮЧЕВЫЕ СПЕЦИАЛИСТЫ:

В. Л. Высоцкий, д.т.н. — методология стратегического планирования, радиоэкология

В. П. Билашенко, к.т.н. – анализ и оценка сценариев возможных аварий на затопленных ЯРОО

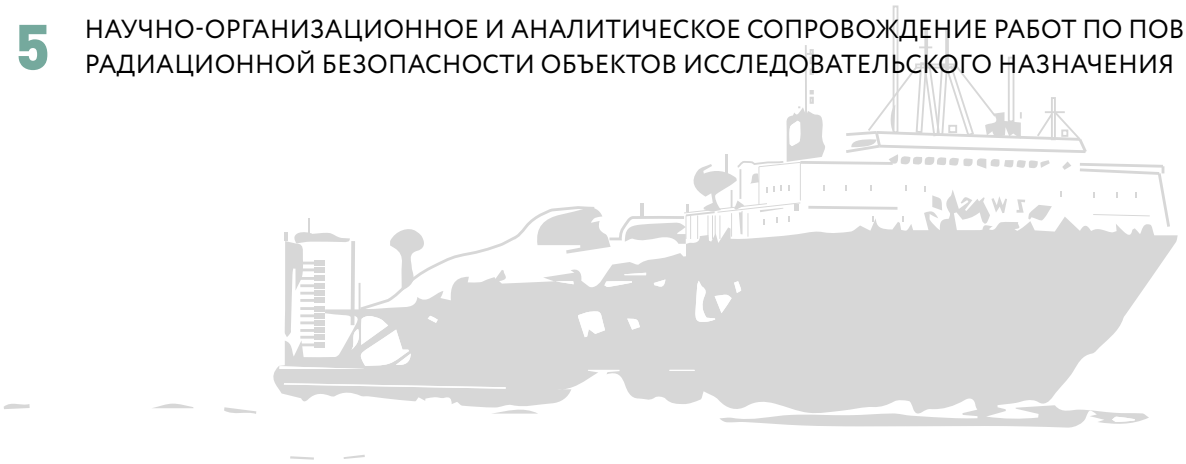
М. Н. Кобринский, к.ф.-м.н. — долгосрочное планирование в сфере ядерной и радиационной безопасности, информационные системы управления

Г. Э. Ильющенко, к.т.н. — планирование и реализация мероприятий по повышению радиационной безопасности объектов РАН

В. А. Сотников, к.т.н. — разработка математических моделей процессов деградации защитных барьеров и их влияния на радиационную безопасность

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ в 2019 году:

1. ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОБЛЕМ, СВЯЗАННЫХ С ЗАТОПЛЕННЫМИ В АРКТИКЕ РАДИАЦИОННО ОПАСНЫМИ ОБЪЕКТАМИ (ЗЯРОО)
2. ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ МАЛОЙ МОЩНОСТИ В УДАЛЕННЫХ РЕГИОНАХ
3. ИССЛЕДОВАНИЯ СЦЕНАРИЕВ И ПОСЛЕДСТВИЙ РЕАЛЬНЫХ И ВОЗМОЖНЫХ АВАРИЙ ТРАНСПОРТНЫХ, ТРАНСПОРТИРУЕМЫХ И МАЛЫХ СТАЦИОНАРНЫХ ЯЭУ
4. ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ РЕАЛИЗАЦИИ СМП УТИЛИЗАЦИИ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ РЕАБИЛИТАЦИИ ОБЪЕКТОВ АТОМНОГО ФЛОТА
5. НАУЧНО-ОРГАНИЗАЦИОННОЕ И АНАЛИТИЧЕСКОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ РАБОТ ПО ПОВЫШЕНИЮ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТОВ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ



ОСНОВНЫЕ ИТОГИ 2019 ГОДА:

1. Исследования проблем, связанных с затопленными в Арктике радиационно опасными объектами

Постоянно возрастающий интерес к освоению Арктики заострил внимание на проблеме затопленных в 1960—1993 гг. в ее акватории большого числа ядерных и радиационно опасных объектов. Хотя из-за длительного их пребывания на дне и в силу процессов естественной дезактивации большинство из них перестало представлять какую-либо опасность, тем не менее, несколько десятков объектов, в основном, содержащие ОЯТ или большое количество ТРО, требуют исследований и анализа ситуации для принятия решения об их дальнейшей судьбе.

После опубликования в 1991 г. доклада Правительственной комиссии по проблеме затопленных в Арктике ЯРОО, вызвавшего всплеск повышенного внимания специалистов и общественности к этой проблеме, волна всеобщего интереса достаточно быстро угасла. И только в результате целенаправленных и настойчивых усилий группы ученых Курчатовского института, НИКИЭТ, ИБРАЭ РАН, НИПТБ «ОНЕГА» удалось возродить этот интерес и перевести его в практическую плоскость. С тех пор в Институте проводятся исследования с целью прогнозирования и оценки последствий возможных радиационных аварий на этих объектах и разрабатываются предложения по решению проблемы ЗЯРОО.

В течение последних пяти лет специалисты ИБРАЭ РАН в составе международного консорциума (Норвегия, Великобритания, Италия, ФРГ, Франция) принимали участие в совместной работе по заказу Еврокомиссии «Технико-экономическое исследование и разработка плана действий по безопасному и надежному обращению с радиационно опасными объектами, затопленными в арктических морях» (рис. 2.2.11). Эта работа была успешно завершена в 2019 году.

Основой исследований явилось математическое моделирование процессов коррозионного разрушения защитных барьеров затопленных объектов с выходом радионуклидов в окружающую среду, распространения радионуклидов в океане в случае их выхода из затопленных объектов, а также оценка их воздействия на окружающую среду и население.

На заключительном этапе работы в 2019 г. были проанализированы возможные варианты обращения с шестью наиболее потенциально опасными объектами, в которых находится отработавшее ядерное топливо. Для каждого варианта оценивались его длительность и стоимость, а также наличие необходимых производственных ресурсов и технологий.

Для выбора оптимального для каждого из шести объектов варианта была разработана и согласована методика многофакторного анализа, учитывающая потенциальные риски гипоте-

Рисунок 2.2.11 – Проект «Технико-экономическое исследование и разработка плана действий по безопасному и надежному обращению с радиационно опасными объектами, затопленными в арктических морях»

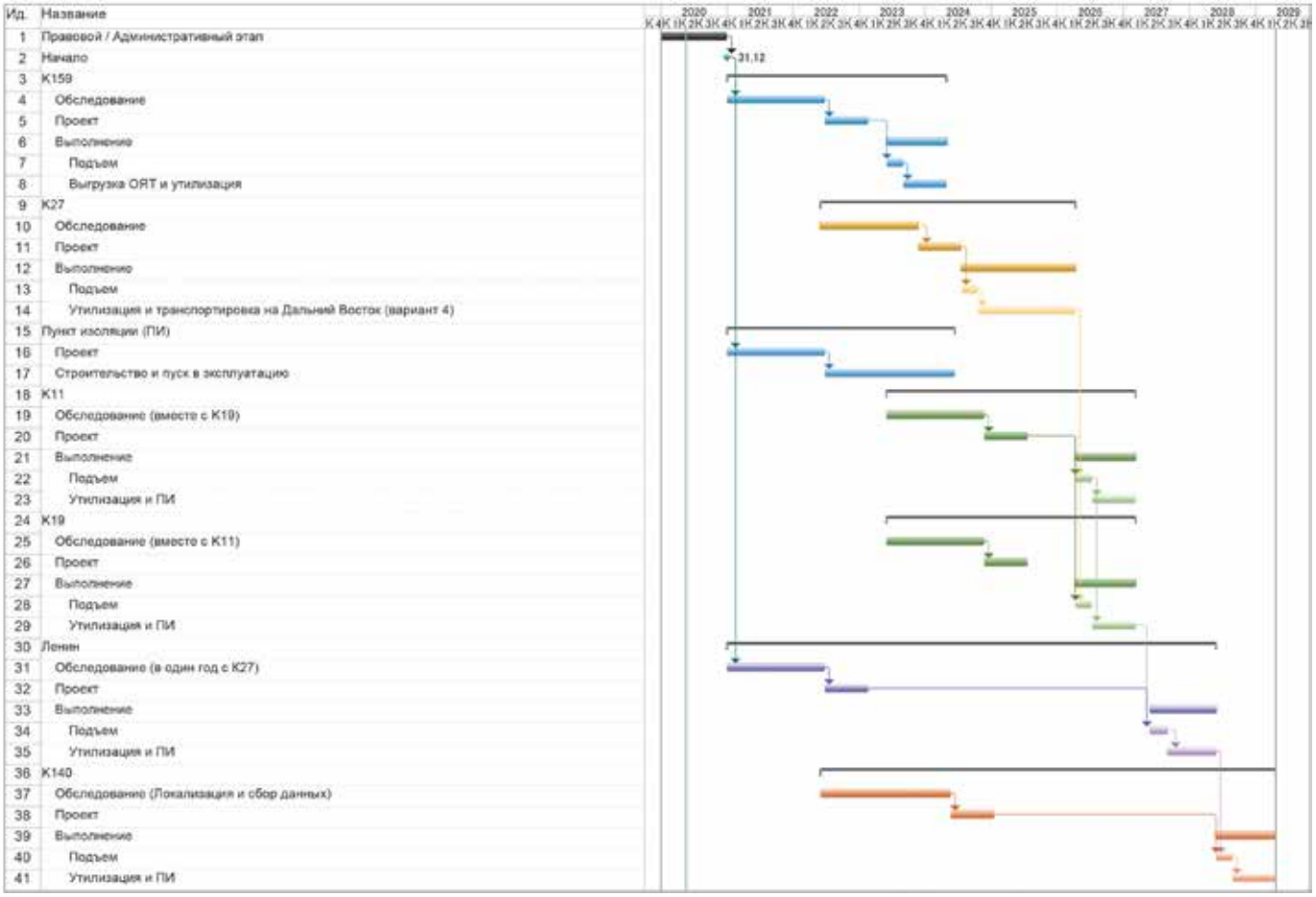


Рисунок 2.2.12 – Диаграмма Гантта для работ по решению проблемы затопленных объектов

тических аварийных событий, стоимостные и ресурсные затраты на реализацию каждого варианта, а также социально-психологические факторы.

По результатам расчетов был выбран и обоснован оптимальный вариант действий по радиоэкологической очистке Арктической акватории и сделан вывод о том, что два объекта из шести — АПЛ К-27 и Б-159 требуют первоочередных безотлагательных мер по их реабилитации (подъему и утилизации) и приведению в безопасное для окружающей среды и населения состояние. Разработан проект плана действий по реализации этих мероприятий, проиллюстрированный диаграммой Гантта на рис. 2.2.12. Результаты данного исследования в качестве технической помощи переданы Еврокомиссией Государственной Корпорации «Росатом», как бенефициару от России.

2. Исследования возможности использования в Арктике атомных станций малой мощности

В течение многих лет ИБРАЭ РАН активно участвует в постановке, исследовании и продвижении работ по использованию атомных станций малой мощности в Арктике. Организованные по инициативе и при активном участии Института две международные конференции по этой тематике придали существенный импульс развитию данного направления.

В 2019 году активизировалась деятельность по расширению использования ядерных энергетических установок в Арктике. Распоряжением Правительства Российской Федерации от 21.12.2019 № 3120-р утвержден план развития инфраструктуры Северного морского пути на период до 2035 года, в который, помимо мероприятий, направленных на развитие ледокольного флота, включен пункт о возможном применении контейнеровозов ледового класса, работающих на ядерном топливе.

В области перспектив развития энергетической инфраструктуры Северного морского пути и прибрежных территорий также произошли изменения. В городе Певек 19.12.2019 г. подключена к сети первая в мире плавучая атомная теплоэлектростанция (ПАТЭС) «Академик Ломоносов» (рис. 2.2.13). С учетом планов по росту энергетических нагрузок и сообщений

Рисунок 2.2.13 – ПАТЭС «Академик Ломоносов»

разработчиков АСММ в открытых источниках информации о готовности соответствующих технологий, определены предварительные площадки размещения АСММ (на базе реакторных установок РИТМ-200, «Шельф», АБВ-6Э); ввод в эксплуатацию пилотных станций планируется в период 2027—2030 гг.

Интенсификация использования потенциально радиационно опасных объектов (атомных ледоколов, транспортабельных и стационарных атомных станций малой и средней мощности), выбор их перспективных пунктов размещения и маршрутов перемещения требуют учета, научного обоснования, оценки угроз, рисков и анализа последствий при возможных радиационных авариях на этих объектах.

В 2019 году в рамках исследований по формированию методических подходов и математических моделей для прогнозирования распространения радионуклидов в атмосфере и акватории Арктики в случае их выхода в окружающую среду при авариях на атомных плавучих объектах были продолжены работы по определению возможных пунктов базирования атомных объектов в Арктике и выработке мер по минимизации последствий таких аварий.

3. Исследования сценариев и последствий реальных и возможных аварий транспортных, транспортируемых и малых стационарных ЯЭУ

Реконструкция и оценка последствий ядерной аварии на АПЛ в бухте Чажма. Аварии на объектах атомной энергетики являются редкими событиями и отличаются между собой по исходным предпосылкам, протеканию и последствиям. Большинство из них достаточно хорошо изучено (МАЯК, 1957 г., ЧАЭС, 1986 г., Фукусима, 2011 г.). Однако имеющая ряд уникальных особенностей, поучительная во многих отношениях, крупнейшая в истории корабельной ядерной энергетики авария на АПЛ в бухте Чажма неоправданно была забыта. В течение всего времени после аварии по ряду причин многое оставалось неизвестным и трактовалось неоднозначно. Сведения об аварии носили закрытый характер, а появлявшиеся публикации давали отрывочные, не всегда точные и зачастую противоречивые оценки ее последствий. Документальные данные (результаты замеров, журналы, отчеты) по различным причинам все еще остаются недоступными.

Коллектив исследователей ИБРАЭ под руководством академика А.А. Саркисова в инициативном порядке осуществил реконструкцию событий, связанных с аварией, а также комплексный анализ ее причин и последствий. Задача оказалась чрезвычайно сложной, потому что авторы столкнулись с необходимостью не только обобщения и анализа имеющихся натурных данных, но и проведения ретроспективного прогноза и математического моделирования для реконструкции ее последствий. Методология была основана на сборе, анализе разрозненных данных и создании на их основе с использованием современных методов и технологий целостного образа произошедшей ядерной аварии, приемлемого для нормативной оценки ее последствий.

Ретроспективный прогноз осуществлялся с применением программных средств ПАРРАД и РОУЗ, разработанных в ИБРАЭ РАН. Адаптация ПС ПАРРАД для оценки последствий аварии в

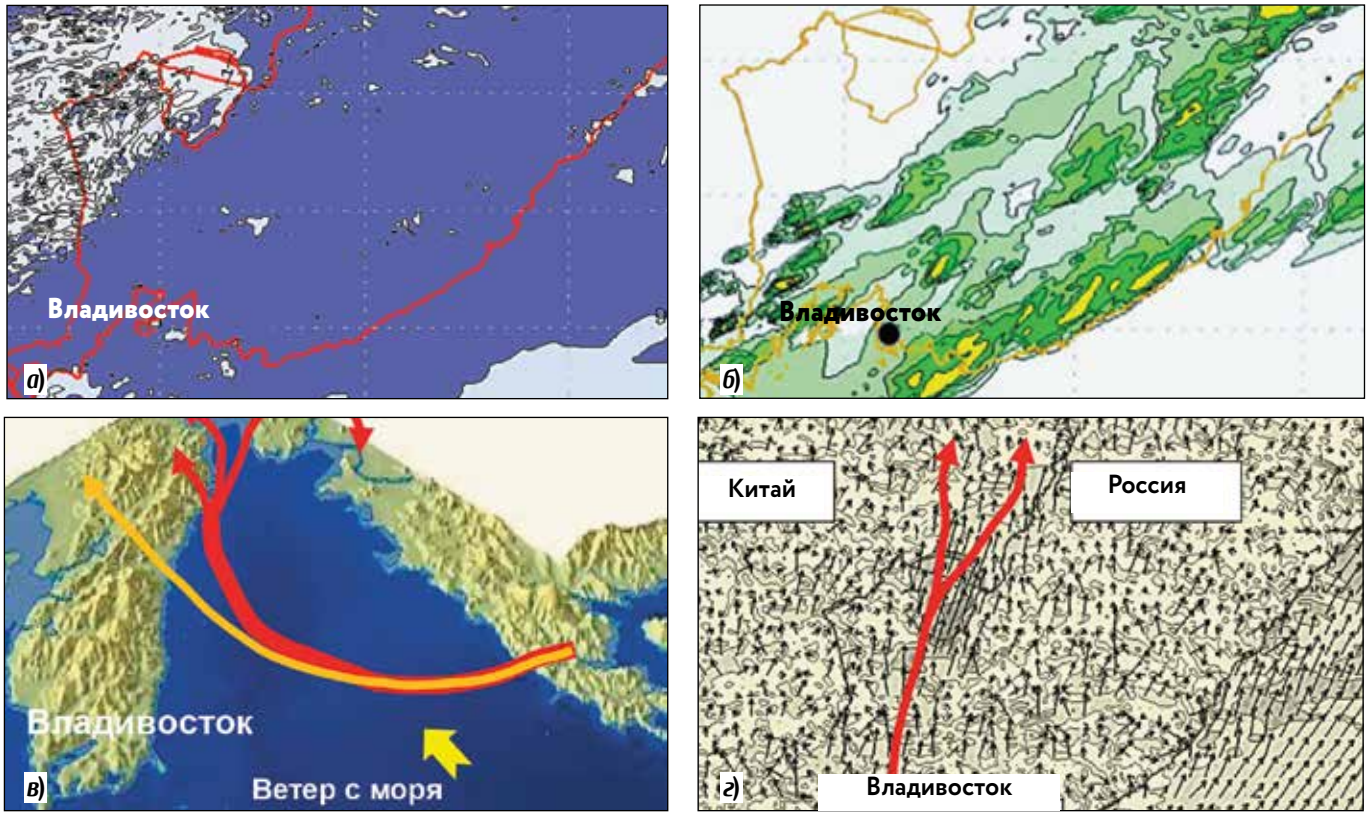


Рисунок 2.2.14 — Результаты восстановления облачности, атмосферного фронта и выпадения дождя, включая траектории перемещения радиоактивных веществ в течение суток после ядерной аварии в Уссурийском заливе, над территориями Приморского края и Китая

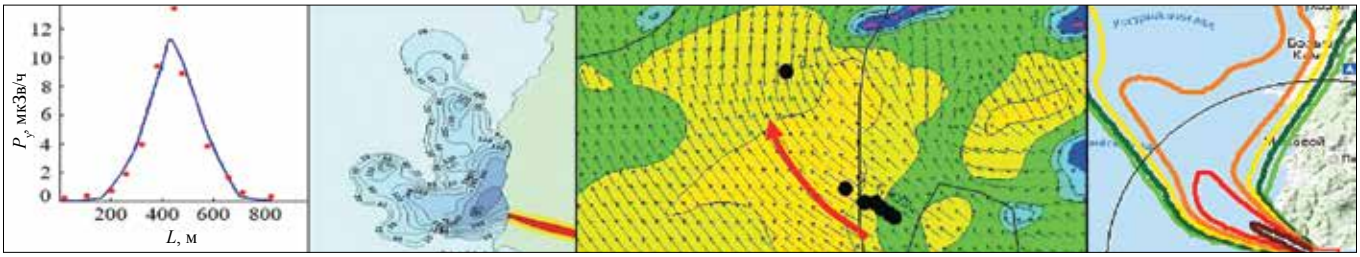


Рисунок 2.2.15 — Адаптация ПС ПАРРАД к получению результатов прогноза, сопоставимых с реальными данными по загрязнению окружающей среды на береговом радиоактивном следе (полуостров Дунай) и при его выходе в акваторию Уссурийского залива

бухте Чажма была проведена путем проверки сходимости натурных данных с результатами прогноза по загрязнению полуострова Дунай. Расхождение по мощности экспозиционной дозы укладывалось в диапазоне ±15%, по ширине следа — в диапазоне ±27%, при мощности источника образования берегового радиоактивного следа по ^{60}Co, составившей 7±3 ТБк, в то время как на судоремонтном заводе мощность выброса составляла 13±4 ТБк. Это позволило прийти к заключению, что выпадение радиоактивных веществ на территории завода и столкновение облака с сопкой снизили выброс ^{60}Co и остальных радионуклидов на ~85%.

ПС ПАРРАД было оптимизировано также и в интересах отображения разделения конфигурации реального загрязнения донных отложений в Уссурийском заливе у берега в двух направлениях. Анализ результатов по восстановлению метеообстановки показал, что это явление было вызвано различиями в скорости и направлении ветра в слоях воздуха на высотах до 100 м и выше 100 м. При обтекании мыса Голый (высота 18—21 м) воздушным потоком с Японского моря в прибрежной зоне возник сдвиговый поток северного направления. Установлено, что превышение скорости ветра в 1,5—2 раза на высотах более 100 м по отношению к нижележащему слою способствовало опережающему переносу примеси в верхних слоях в западном направлении, в то время как основная часть перемещалась над заливом на север (рис. 2.2.14, 2.2.15).

В ходе проведенных исследований был выполнен комплексный анализ экспериментальных данных и результатов прогноза, сделана оценка источников радиоактивного загрязнения окружающей среды и выброса дозообразующих радионуклидов из аварийного реактора АПЛ в атмосферу, осуществлены ретроспективные расчеты погодных условий в бухте Чажма и прилегающих районах на период, предшествующий ядерной аварии и на последующие сутки, а также выполнен ретроспективный прогноз переноса и распространения радиоактивных веществ над акваторией залива Петра Великого, территориями Приморского края и прилегающей части Китая. Это позволило обосновать исходные данные и граничные условия, необходимые для оценки радиационных последствий аварии с точки зрения воздействия на население и окружающую среду на удалении до 300—400 км от источника опасности.

Ретроспективный прогноз радиоактивного загрязнения п-ова Дунай, Уссурийского залива, Приморья и Китая показал, что плотность выпадений по мере удаления от места аварии изменялась в следующих диапазонах:

- п-ов Дунай — 10^5—10^6 Бк/м^2;
- Уссурийский залив — 10^2—10^3 Бк/м^2;
- территория Приморья 1—10 Бк/м^2;
- территория Китая — < 1 Бк/м^2

при фоне, обусловленном глобальными выпадениями (4,4±0,7)·10^3 Бк/м^2 (рис. 2.2.16, 2.2.17). Через 24 ч после аварии вклад радионуклидов в загрязнение определялся (в %) как: ^{60}Co ~ 90, ^{131}I ~ 1, ^{133}I ~ 4, ^{135}I ~ 3, ^{132,134}I < 0,01, ^{137}Cs и ^{90}Sr < 0,02. За время прохождения радиоактивного облака от места аварии до вершины Уссурийского залива (на расстояние 60 км) объемная активность дозообразующих радионуклидов в воздухе в результате радиоактивного распада, рассеяния и вымывания атмосферными осадками понизилась в 10^5—10^6 раз, на расстоянии 400 км — в 10^7—10^8 раз. Наибольшее загрязнение Уссурийского залива отмечено на необитаемом мысе Седловидный, который находится вблизи берегового радиоактивного следа (3,8·103 Бк/м^2, 0,03 мкЗв/ч). В остальных местах оно не превышало (0,7—1,0) 10^3 Бк/м^2 и 0,01 мкЗв/ч (что составляет < 30% фона). В Примо-

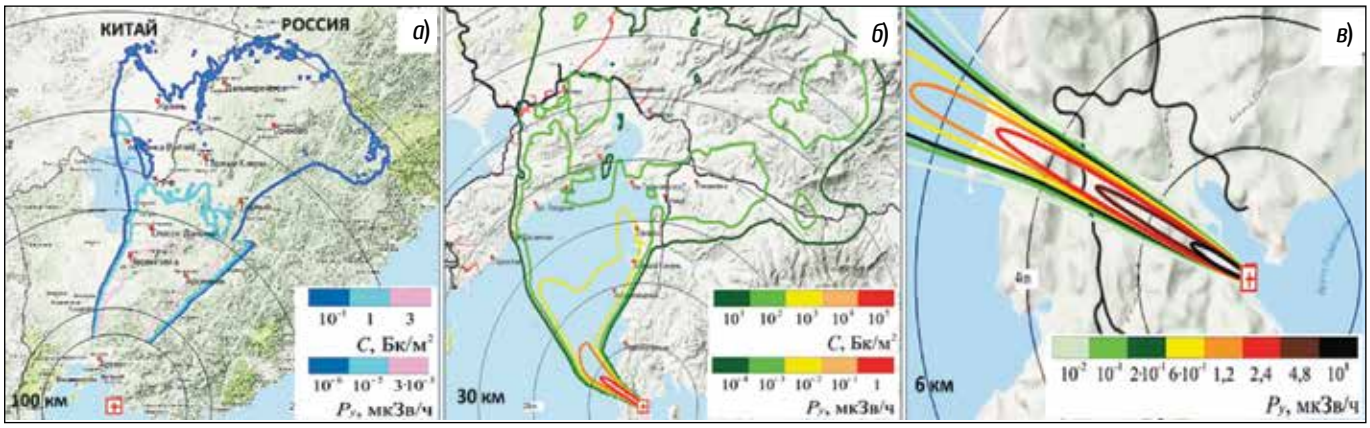


Рисунок 2.2.16 — Изменение плотности выпадения и мощности дозы ^{60}Co на полуострове Дунай (*а*), в Уссурийском заливе (*б*), на территории Приморья и приграничной зоне Китая (*в*)

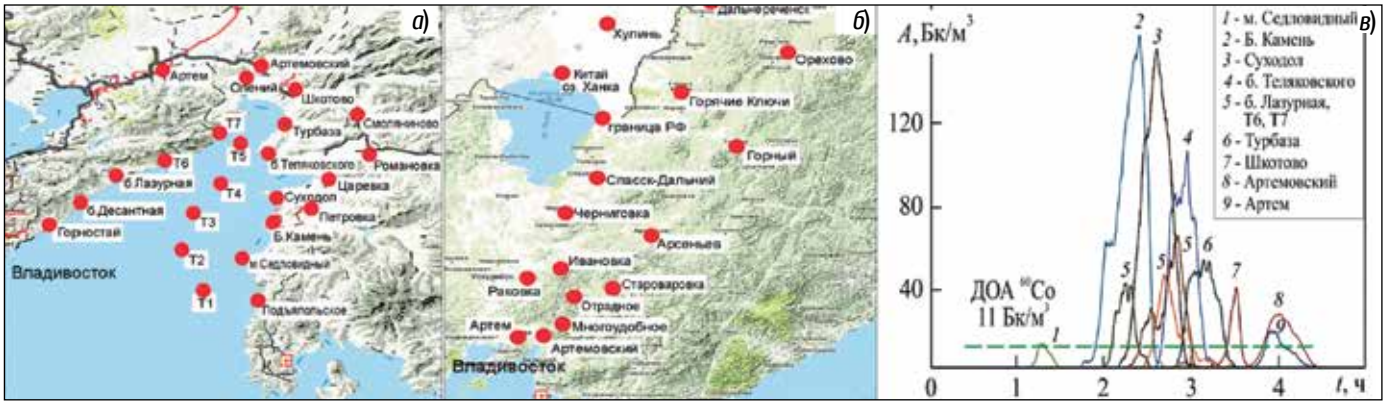


Рисунок 2.2.17 — Города, населенные пункты и рекреационные зоны, находившиеся на пути перемещения радиоактивного облака: Уссурийский залив (*а*); Приморье, Китай (*б*). Активность ^{60}Co в приземной атмосфере и время контакта населения с облаком (*в*)

Таблица 1 – Доза облучения от радиоактивного облака при его прохождении над п-вом Дунай, мЗв

Одноразовое воздействие ^{60}Co и изотопами йода за 10 мин	Расстояние от места аварии, км				
	1,2	2	3	4	5,5
Внешнее облучение	0,08	0,03	0,02	0,01	<0,01
Ингаляционный путь:					
все органы;	0,44	0,17	0,11	0,06	0,03
легкие;	0,25	0,11	0,06	0,01	<0,01
щитовидная железа.	0,02	0,01	<0,01	<0,01	<0,01

По НРБ-99/2009 при нормальной эксплуатации объекта допустимая эффективная доза для персонала составляет 20 мЗв/год, населения – 1 мЗв/год.

рье и приграничной зоне Китая эти показатели составляли 0,01—1% от фона. На всех стадиях аварии долговременное загрязнение на 95—99% определялось ^{60}Co.

Сравнение загрязнения почвы ^{60}Co с допустимой нормой показало, что на радиоактивном следе (необитаемый полуостров Дунай) оно превышало норму в десятки раз, и в случае проживания населения в этой зоне ему рекомендовалось бы отселение. На берегу Уссурийского залива почва характеризовалась как чистая, режим проживания обычный.

Дозовая нагрузка на население. Ретроспективный прогноз выполнен по определяющим дозообразующим радионуклидам $^{131-135}$I, ^{137}Cs и ^{90}Sr, которые образовались при СЦР в свежем ядерном топливе, и по ^{60}Co, накопленному в конструктивах за три кампании (см. табл. 1).

Расчеты показали, что дозовая нагрузка для населения нигде не превышала норм, допустимых при повседневной безаварийной эксплуатации ядерных объектов. Превышение уровня 5 мЗв/год мог получить только персонал, занимавшийся реабилитацией последствий аварии на заводе и в районе радиоактивного следа на полуострове Дунай (см. табл. 2).

В сравнении со среднемировой дозой облучения на душу населения от естественных источников (2400 мкЗв/год при разбросе от 1000 до 10000 мкЗв/год), приведенные оценки не превышали 1—2% от фона (рис. 2.2.18). В береговой зоне Уссурийского залива эти показатели оказались ниже фона в сотни и тысячи раз, еще ниже — на территории Приморья и прилегающей территории провинции Хэйлунцзян (Китай). По НРБ-99/2009 допустимая норма для населения (1 мЗв/год) не была превышена, меры для защиты населения не требовались.

Таблица 2 – Доза облучения при реабилитации радиоактивного следа, мЗв

Расстояние от места аварии, км (п-ов Дунай)	Время нахождения на местности, сут		
	1	10	365
0,6	0,33	2,8	77,3
1,2	0,24	2	65,8
2	0,18	1,5	50
3	0,14	1,2	38,9
4	0,1	0,8	26,5
5,5	0,05	0,3	11

Радиационная опасность была минимизирована, во-первых, тем, что районы плотного проживания населения отдалены от места аварии на 20—40 км, а само место аварии расположено во внутренней бухте Чажма, входящей в залив

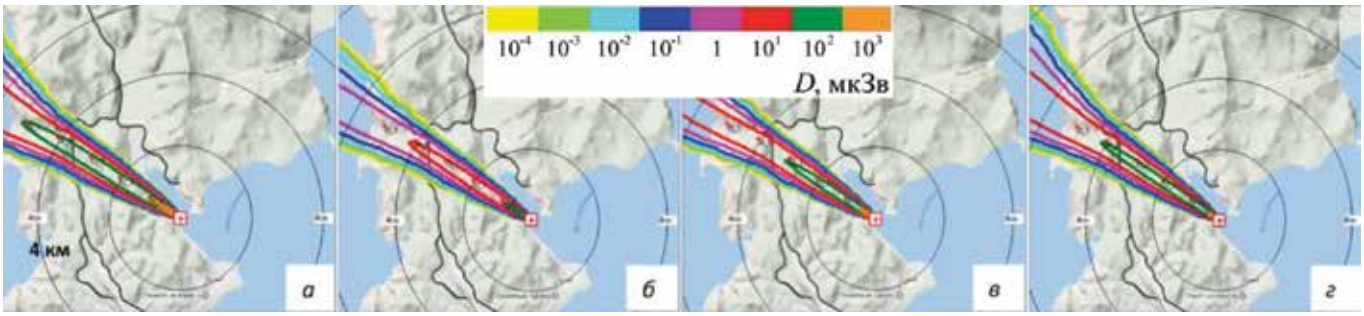


Рисунок 2.2.18 – Суммарная эффективная (а), внешняя (б) и внутренняя (в) ингаляционная доза облучения от радиоактивного облака и внешняя доза (г) при нахождении взрослого населения до 24 ч на загрязненном полуострове Дунай

Стрелок, который от Японского моря отделен частью залива Петра Великого. Во-вторых, важную роль в минимизации опасных последствий аварии сыграл рельеф местности, представляющий собой покрытые лесом сопки высотой 50—200 м и долины, формирующие локальные ветры, а также пасмурная и дождливая погода, установившаяся в день аварии. Ветер в Уссурийском заливе изменил свое направление, вследствие чего радиоактивное облако прошло в отдалении от Владивостока, и выпадение радиоактивных веществ в основном происходило в открытом море посреди Уссурийского залива (см. рис. 2.2.16, б).

Особенность аварии в бухте Чажма состоит в том, что, в отличие от других аварий в ядерной энергетике, здесь имели место поражающие факторы, характерные для ядерного взрыва — ударная волна, световое излучение и электромагнитный импульс. При этом основным, определившим масштабы человеческих потерь, фактором, явилась ударная волна, что свидетельствует об условности границы между тепловым и ядерным взрывом.

Выполненный первый этап намеченного цикла исследований позволил впервые представить целостную картину причин аварии, ее протекания и многообразных последствий. Полученные результаты вносят актуальный вклад в дальнейшее изучение и повышение безопасности ядерной энергетики.

4. Информационно-аналитическое сопровождение реализации СМП утилизации и экологической реабилитации объектов атомного флота

Реализация сложных проектов требует применения современных методов организации работ, стратегического планирования и проектного управления. Удачным примером научного обоснования, разработки и практического применения такого подхода является «Стратегический Мастер-план утилизации и экологической реабилитации выведенных из эксплуатации объектов атомного флота и обеспечивающей инфраструктуры в Северо-Западном регионе России» (СМП)». Этот сложный многоплановый и многоуровневый документ, в подготовке которого принимали участие ведущие специалисты пятнадцати организаций России и двух организаций США и Великобритании. ИБРАЭ РАН являлся головной организацией по разработке СМП, который успешно прошел международную экспертизу и был официально введен в действие руководством Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом». С целью информационно-аналитического и научно-организационного сопровождения реализации СМП была разработана информационная система управления программой (ИСУП), которая, по завершении опытной эксплуатации, с 2010 г. и по настоящее время находится в промышленной эксплуатации в ГК «Росатом». Эксплуатация системы осуществляется силами сотрудников отдела 12 ИБРАЭ РАН. В ходе этой деятельности в ИСУП были также включены работы по решению проблем, связанных с ядерным наследием и реабилитацией выведенных из эксплуатации объектов атомного флота атомного флота в Дальневосточном регионе РФ.

В 2019 г. выполнялись 44 проекта Программы комплексной утилизации (ПКУ), в том числе по направлениям:

- Утилизация АПЛ и РБ — 9;
- Утилизация НК с ЯЭУ — 3;
- Утилизация судов АТО — 6;
- Реабилитация ПВХ пос. Гремиха — 2;
- Реабилитация ПВХ гб. Андреева — 10;
- Обращение с ОЯТ — 5;
- Обращение с РАО — 9.

В течение всего периода совместной с СКЦ ГК «Росатом» эксплуатации ИСУП ежедневно в автоматическом режиме поддерживалась синхронизация данных и интерфейсов между основной и зеркальной (размещенной на серверах СКЦ) площадками. ИСУП обеспечивает ответственных за выполнение ПКУ сотрудников ГК «Росатом» возможностью создания персонифицированных перечней контролируемых ими работ с визуальной индикацией возникших отставаний и рисков.

В базу данных ИСУП поступают: информация о ходе реализации всех обеспеченных контрактами работ по программе комплексной утилизации, а также решения совещаний по отдельным направлениям работ. Средствами ИСУП проводится анализ критических путей и узких мест в календарных планах и осуществляется контроль за выполнением решений совещаний. В ГК «Росатом» периодически и по запросу представляются формируемые ИСУП отчеты с детальной и сводной информацией о ходе работ.

Примеры представления детальной и сводной информации по утилизации АПЛ на конец 2019 г. приведены на рис. 2.2.19 и в табл. 3.

Утилизация выведенных из состава ВМФ АПЛ Северного флота России по состоянию на 01.09.2020

Обозначение		Текущее состояние	Состояние ОЯТ	Ключевые этапы работ (ММ.ГГ)					Источники финансирования	
класс	зав. №			выгр. ОЯТ	форм. РБ	форм. РО	постан. ПДХ(ПИ)	очеред. ДО (Г)	выгрузка ОЯТ, форм. РБ, пост. в ПВХ	формирование РО, пост. в ПДХ
	120	РО, ПДХ «Сайда»	Выгр.	09.06	— — —	09.07	11.07		РФ	РФ
Акула	821	РБ, ПДХ «Сайда» стапель	Выгр.	09.09	08.10				РФ	
Альфа	105	РО, ПДХ «Сайда»	Выгр.	09.05	— — —	11.06	10.08		РФ	РФ
Альфа	106	РО, ПДХ «Сайда»	Выгр.	09.91	03.96	12.09	07.10		РФ	РФ
Альфа	107	РО, ПДХ «Сайда»	Выгр.	08.92	03.95	12.09	07.10		РФ	РФ
Альфа	900	РО, ПДХ «Сайда»	Выгр.	11.12	11.85	09.16	09.16		Франция, РФ	РФ
Альфа	905	РО, ПДХ «Сайда»	Выгр.	08.89	07.95	07.08	10.08			

Утилизация выведенных из состава ВМФ АПЛ Тихоокеанского флота России по состоянию на 01.09.2020

Обозначение		Текущее состояние	Состояние ОЯТ	Ключевые этапы работ (ММ.ГГ)					Источники финансирования	
класс	зав. №			выгр. ОЯТ	форм. РБ	форм. РО	постан. ПДХ(ПИ)	очеред. ДО (Г)	выгрузка ОЯТ, форм. РБ, пост. в ПВХ	формирование РО, пост. в ПДХ
Акула	501	РО, ПДХ «Устричный»	Выгр.	09.05	01.07	03.19	04.19		РФ	РФ
Акула	502	РБ, ПВХ б. Разбойник	Выгр.	09.11	09.19				Канада, РФ	
Акула	513	АПЛ, АСЗ стапель	Выгр.	07.03					РФ	
Виктор	610	РБ, ПИ б. Разбойник	В АЗ		10.11				РФ	РФ
Виктор-I	612	РО, ПДХ «Устричный»	Выгр.	10.05	12.06	05.16	07.16		РФ	РФ
Виктор-I	614	РО, ПДХ «Устричный»	Выгр.	08.06	12.07	04.17	04.17		РФ	РФ
Виктор-III	271	РО, ПДХ «Устричный»	Выгр.	03.09	09.09	10.17	10.17		РФ, Япония	РФ
Виктор-III	282	РО, ПДХ «Устричный»	Выгр.	02.10	11.10	10.17	10.17		Канада	РФ
Виктор-III	295	РО, ПДХ «Устричный»	Выгр.	09.08	11.09	07.20	08.20		РФ	РФ
Виктор-III	299	РО, ПДХ «Устричный»	Выгр.	10.08	05.09	04.20	05.20		РФ	
Виктор-III	300	РО, ПДХ «Устричный»	Выгр.	03.10	11.10					

Рисунок 2.2.19 — Фрагменты детальной информации о ходе утилизации выведенных из состава ВМФ АПЛ Северного и Тихоокеанского флотов по состоянию на конец 2019 г.

Таблица 3 — Итоговые данные по утилизации АПЛ по состоянию на конец 2019 г.

Атомные подводные лодки	СФ	ТОФ	Всего
Выведено АПЛ из состава ВМФ	124	83	207
Утилизировано АПЛ	120	79	199
АПЛ в стадии утилизации		1	1
АПЛ ожидают утилизации	3	3	6
Особое решение	1		1
АПЛ с невыгруженным ОЯТ	4		4
АПЛ с выгруженным ОЯТ	120	81	201

Реакторные блоки и отсеки	СФ	ТОФ	Всего
Многоотсечные РБ			
На стапеле (в доке)	4	5	9
На плаву	1	15	16
В пункте изоляции (с ОЯТ)		2	2
Реакторные отсеки			
Сформировано	119	57	176
Размещено в ПДХ	119	55	174

Примечание: утилизированными считаются АПЛ, разделанные до состояния многоотсечного или одноотсечного блока

5. Научно-организационное и аналитическое сопровождение работ по повышению радиационной безопасности объектов исследовательского назначения

Проблемы в области радиационной безопасности (РБ) объектов РАН носят во многом исторический характер и проистекают, в основном, из тех времен, когда более 150 институтов РАН 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 радиационно опасные объекты РАН расположены в крупных городах, их немалое число и далеко не лучшее состояние, работы по ликвидации накопленных проблем в области радиационной безопасности объектов РАН были предусмотрены ФЦП «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2008—2010 годы и на период до 2015 года» (ФЦП ЯРБ-1). ИБРАЭ участвует в этих работах с 2009 года на основании Распоряжения Президиума РАН и Государственных контрактов, заключенных с ГК «Росатом».

Для эффективного решения указанных задач ИБРАЭ РАН в 2011 году разработал Стратегический план повышения радиационной безопасности объектов РАН (СП РАН), который успешно выполняется до настоящего времени. В СП РАН выполнен анализ состояния радиационной безопасности в организациях РАН, составлен перечень объектов РАН, на которых имеются проблемы в данной области, 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 приоритезации первоочередных работ, а также выполнено календарное планирование и планирование финансового обеспечения процесса.

Несмотря на большой объем выполненных работ, перечень нерешенных проблем все еще остается значительным, в т. ч., из-за структурных преобразований РАН, увеличения количества объектов РАН после слияния с ней РАМН и РАСХН.

В 2019 году были завершены проводившиеся в течение ряда лет в соответствии со Стратегическим планом повышения радиационной безопасности объектов РАН работы по ликвидации радиационного наследия в 14 организациях Российской академии наук.

Рисунок 2.2.20 — Расположение радиационно опасных объектов РАН

В частности, в рамках этих работ было проведено радиационное обследование помещений лабораторного корпуса НИИ МТ, в результате которого в помещении хранилища РАО было обнаружено и ликвидировано путем дезактивации два локальных очага радиоактивного загрязнения, а радиационная обстановка в НИИ МТ была приведена в соответствие с критериями нормализации радиационной обстановки.

Всего в 2019 году в соответствие требованиям ФНП РФ по РБ были приведены 24 помещения для работы с ИИИ, РВ, РАО в 6 организациях РАН, восстановлена работоспособность инженерных спецсистем (спецвентиляции и спецканализации) в 4 организациях РАН;

На основе изучения характера и оценки возможных уровней излучения, для 7 объектов РАН определен оптимальный набор дозиметрических приборов и выполнена модернизация системы радиационного и дозиметрического контроля.

6. Доклады на международных и отраслевых научно-технических мероприятиях в 2019 г.

- 21-е совещание Российско-Норвежской комиссии по сотрудничеству в области охраны окружающей среды. Сочи, 21—22 мая 2019 г. «Особенности долговременного мониторинга радиоактивного загрязнения морской среды радиационно опасными объектами».
- 22-е совещание Российско-Норвежской комиссии по сотрудничеству в области охраны окружающей среды. Тромсё, 20—21 июня 2019 г. «Результаты финансируемого Европейской комиссией проекта «Технико-экономические исследования и разработка плана действий по безопасному и надежному обращению с радиационно опасными объектами, затопленными в арктических морях».
- 8-й Информационный рабочий семинар «Результаты сотрудничества по повышению ядерной и радиационной безопасности на Северо-Западе России». Мурманск, 26 сентября 2019 г. «Радиоэкологические последствия гипотетических аварий на ядерно опасных объектах, находящихся на дне Арктики».
- Заключительная конференция по проекту «Технико-экономические исследования и разработка плана действий по безопасному и надежному обращению с радиационно опасными объектами, затопленными в Арктических морях», Москва, 13 декабря 2019 г. «Правовые и организационные аспекты решения проблемы затопленных в Арктике ядерно и радиационно опасных объектов»; «Сценарии выбросов и распространения радиоактивности от затопленных объектов».

КЛЮЧЕВЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАБОТ:

1. Sarkisov A. A., Antipov S. V., Vysotskii V. L., Kobrinskii M. N. et al. Forecast of the Radioecological Consequences of Hypothetical Accidents in Nuclear and Radiation Hazardous Objects Located at the Bottom of the Barents and Kara Seas // Atomic Energy. — 2019. — Vol. 125. — № 6. — Pp. 391—399.

2. Саркисов А. А. К вопросу о ликвидации радиоактивных загрязнений в арктическом регионе. // Вестник Российской академии наук. — 2019. — Т. 89. — № 2. — С. 3—20.

3. Саркисов А. А., Сотников В. А., Антипов С. В., Кобринский М. Н., Билашенко В. П. Оптимизация стохастической модели коррозионного разрушения защитных барьеров в морской среде для оперативной оценки их состояния и имитационного моделирования технических решений // Известия РАН. Энергетика. — 2019. — № 4. — С. 130—135.

4. Антипов С. В., Кобринский М. Н., Шведов П. А. и др. // Возможные способы обращения с затопленными в Арктическом регионе ЯРОО после их подъема на примере АПЛ К-27. // Арктика: экология и экономика. — 2020. — № 1 (37). — С. 37—44.

5. Саркисов А. А., Высоцкий В. Л., Припачкин Д. А. // Восстановление радиоактивного загрязнения окружающей среды в Приморском крае вследствие ядерной аварии на атомной подводной лодке в бухте Чажма. // Атомная энергия. — 2019. — Т. 127. — Вып. 3. — С. 144—150.

6. Саркисов А. А., Высоцкий В. Л., Припачкин Д. А., Дзама Д. В., Игнатов Р. Ю., Рубинштейн К. Г. Условия и исходные данные для восстановления радиоактивного загрязнения окружающей среды и дозовых нагрузок на население вследствие ядерной аварии на атомной подводной лодке в бухте Чажма. — Атомная энергия. — 2019. — Т. 127. — Вып. 2. — С. 105—111.

7. Саркисов А. А., Высоцкий В. Л., Припачкин Д. А., Панченко С. В. Дозовые нагрузки на население Приморского края вследствие ядерной аварии на атомной подводной лодке в бухте Чажма. — Атомная энергия. — 2019. — Т. 127. — Вып. 4. — С. 221—226.

2.3. БЕЗОПАСНОСТЬ НАСЕЛЕНИЯ

С момента создания Института и по сегодняшний день обеспечение радиационной и радиоэкологической безопасности населения рассматривалось руководством Института как одна из ключевых задач. При этом содержание работ и их результаты со временем существенно менялись.

На протяжении длительного периода времени крупный блок работ был посвящен теме преодоления последствий аварии на Чернобыльской АЭС. Эти работы продолжаются и сегодня. В 2019 году была начата подготовка 6-го Национального доклада Российской Федерации, которая должна завершиться в 2021 году, в 35-ю годовщину аварии. Пять предыдущих докладов 1996, 2001, 2006, 2011 и 2016 годов были также подготовлены и изданы ИБРАЭ РАН с привлечением ряда крупных научных организаций и МЧС России. В 2019 году вышла в свет книга «Ядерная рулетка. Том 1. Чернобыль — Фукусима: Путевые заметки ликвидатора» Р. В. Арутюняна, возглавлявшего работы по этому направлению в Институте.

Начиная с середины 1990-х гг. специалисты Института активно участвовали в разработке научных основ, создании и развитии систем мониторинга радиационной обстановки и аварийного реагирования. Эти работы продолжаются в настоящее время. Институт последовательно развивает методологию сравнительного анализа рисков, которая представляет собой эффективный и научно обоснованный инструмент при разработке рекомендаций для общества и органов государственной власти по реагированию на угрозы радиационного характера. Работы в этом направлении, проводившиеся в 2019 году и связанные с оценками доз и рисков по конкретным объектам, представлены в разделе 2.2.

С 1995 года в Институте функционирует Технический кризисный центр (ТКЦ), в 2013 году преобразованный в Центр научно-технической поддержки (ЦНТП) ИБРАЭ РАН. В настоящее время научные исследования и практические работы в области развития систем аварийной готовности и реагирования осуществляет Отделение развития систем аварийной готовности и реагирования.

РАЗВИТИЕ СИСТЕМ АВАРИЙНОЙ ГОТОВНОСТИ И РЕАГИРОВАНИЯ

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ НАПРАВЛЕНИЯ

Научный руководитель ИБРАЭ РАН

Л. А. Большов

академик РАН
(bolshov@ibrae.ac.ru)

Заведующий отделением

С. Н. Красноперов

(rnk@ibrae.ac.ru)

КЛЮЧЕВЫЕ СПЕЦИАЛИСТЫ:

Е. В. Антоний — проектирование, разработка и внедрение информационных систем для задач аварийной готовности и реагирования на ЧС с радиационным фактором

Р. И. Бакин — вопросы радиационной безопасности и радиационного контроля

В. В. Гайдуков — разработка программного обеспечения для задач радиационного мониторинга

А. А. Киселев, к.т.н. — разработка и применение программных средств моделирования переноса радиоактивных веществ в атмосфере

А. В. Шикин — вопросы радиационной защиты и взаимодействия ионизирующих излучений с веществом

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ:

1. ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО МОДЕЛИРОВАНИЮ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ В ВОЗДУШНОЙ СРЕДЕ
2. РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ, АНАЛИЗА И ПРОГНОЗА РАДИАЦИОННЫХ ПОСЛЕДСТВИЙ НЕШТАТНЫХ/ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ РАДИАЦИОННОГО ХАРАКТЕРА
3. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЧЕРЕЗ ЦЕНТР НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ПОДДЕРЖКИ (ЦНТП) ИБРАЭ РАН НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ И ЭКСПЕРТНОЙ ПОДДЕРЖКИ МЕРОПРИЯТИЙ ПО АВАРИЙНОМУ РЕАГИРОВАНИЮ НА ЧС С РАДИАЦИОННЫМ ФАКТОРОМ, ОСУЩЕСТВЛЯЕМЫХ НА ОТРАСЛЕВОМ, РЕГИОНАЛЬНОМ И ФЕДЕРАЛЬНОМ УРОВНЯХ

В ОСНОВЕ ВСЕХ РАЗРАБОТОК ЛЕЖАТ СЛЕДУЮЩИЕ ОСНОВНЫЕ ПОДХОДЫ:

1. **Кроссплатформенность. Преимущества кроссплатформенности заключаются в том, что разработанный продукт не предъявляет жестких требований к платформе Заказчика.**
2. **Использование свободно распространяемого и широко используемого программного обеспечения с открытыми исходными кодами, что позволяет выполнять требования по импортозамещению в области ПО.**
3. **Поддержка локального и распределенного режимов работы и облачных технологий. Облачные технологии позволяют легко организовать доступ пользователям к разработкам ИБРАЭ РАН. Упрощается техническая поддержка пользователей и решается вопрос обновления ПО.**
4. **Поддержка мультиязычности для участия в зарубежных проектах.**
5. **Использование современных архитектурных решений.**

В 2019 году было выполнен ряд работ, направленных на обеспечение противоаварийной готовности и бесперебойного функционирования территориальных систем радиационного мониторинга и аварийного реагирования в субъектах Российской Федерации (ТС РМ и АР). Являясь постоянно действующими территориально распределенными структурами, которые оснащены современными техническими средствами, имеют доступ к оперативной информации о текущей радиационной обстановке и прогнозах ее развития, укомплектованы квалифицированным персоналом, регулярно участвующим в противоаварийных учениях и тренировках, ТС РМ и АР обеспечивают администрациям регионов возможность эффективного решения задач по защите населения и минимизации социальных напряженностей в случае изменений радиационной обстановки. В рамках совершенствования аварийно-спасательной службы Росатома были выполнены работы по разработке и созданию ряда программно-технических комплексов для аварийного радиационного контроля и мониторинга параметров радиационной обстановки при планировании, подготовке и проведении аварийно-спасательных работ в зоне ЧС с радиационным фактором.

ОСНОВНЫЕ ИТОГИ 2019 ГОДА:

1. 8 августа 2019 года ЦНТП ИБРАЭ РАН с датчиков территориальной АСКРО Архангельской области получил информацию о превышении фоновых значений мощности дозы гамма-излучения до 2 мкЗв/час в г. Северодвинск.

Указанные превышения наблюдались в период с 11:30 до 12:30 (мск). Специалистами ЦНТП ИБРАЭ РАН были проведены необходимые оперативные расчеты, и подготовлена информационно-аналитическая справка, содержащая информацию о том, что дозы внешнего облучения за период превышения фоновых уровней мощности дозы почти в 1000 раз меньше годовой дозы облучения населения от природных источников, регистрируемые уровни мощности дозы не представляют сколь либо значимого риска для здоровья населения г. Северодвинск, и мер радиационной защиты населения не требуется.

Указанная справка была оперативно представлена в НЦУКС МЧС России, ГУ МЧС России по Архангельской области и Ситуационно-кризисный центр Госкорпорации «Росатом», что позволило в короткий срок предотвратить принятие неадекватных мер реагирования, и обеспечить информирование органов управления о безопасности ситуации для населения.

2. Создана программно-аппаратная технология — «связка» лагранжевой стохастической модели атмосферной дисперсии и модели WRF (региональная модель численного прогноза погоды), позволяющая решать как задачи обеспечения аварийной готовности и реагирования на ЧС с радиационным фактором, так и задачи обоснования ОИАЭ, связанные с оценкой последствий запроектных аварий для населения и территорий.

Это особенно актуально в случае рассмотрения тяжелых запроектных аварий, для которых длительности выбросов могут достигать нескольких недель, а выбрасываемые в атмосферу активности могут приводить к масштабному загрязнению на сотни километров от источника. Для целей обоснования безопасности указанная технология позволяет обеспечить учет неопределенности, связанной с неизвестным временем начала аварии, путем проведения серии расчетов с варьируемым началом момента выброса.

В основе этих расчетов лежит тот факт, что даже для относительно длительных выбросов (сутки и более) невозможно создать классификацию метеорологических условий. Поэтому рассчитывается ансамбль результатов моделирования в каждой точке расчетной области со сдвигом времени начала аварии по метеорологической шкале, например, с 1 января по 31 декабря с шагом в 2 часа. Для каждой точки расчетной области приводится консервативная оценка характеристик радиоактивного загрязнения. Далее строится вариационный ряд для наиболее крупных населенных пунктов вокруг ОИАЭ. При проведении таких расчетов в ИБРАЭ РАН используются временные ряды трехмерных метеорологических полей, построенные на основе данных метеорологического и аэрологического мониторинга в районе размещения ОИАЭ. Наиболее современным и точным подходом на сегодня является использование гидродинамических моделей, которые описывают важные с точки зрения влияния на конечный результат физические процессы в атмосфере и позволяют в том числе, учитывать наличие рельефа, морей, сильных неоднородностей подстилающей поверхности и др.

Для проведения расчетов разработан **модуль, ориентированный на работу с кластерными вычислительными установками**, который позволяет проводить многовариантные расчеты с метеорологическими полями, полученными за длительный промежуток времени. Подход позволяет учесть современные требования зарубежных регулирующих органов, и превышает по ряду аспектов (применение современных дозиметрических величин, использование высокопроизводительных вычислений с использованием кластерных вычислительных установок, настройка региональной метеорологической модели с учетом фактических данных) возможности европейских кодов ARGOS и JRODOS.

3. Создана автономная информационная система «Банк электронных карт» (БЭК), как единый источник географических данных для проектов, осуществляемых в ИБРАЭ РАН.

В рамках разрабатываемых в ИБРАЭ РАН научных проектов часто требуется отображение результатов исследований и прогнозов на картографической основе, с возможностью анализа получаемых данных, учитывая их территориальную принадлежность, особенности естественно-гуманитарных параметров (природно-ландшафтные характеристики, расположение населенных пунктов, численность и состав населения в них).

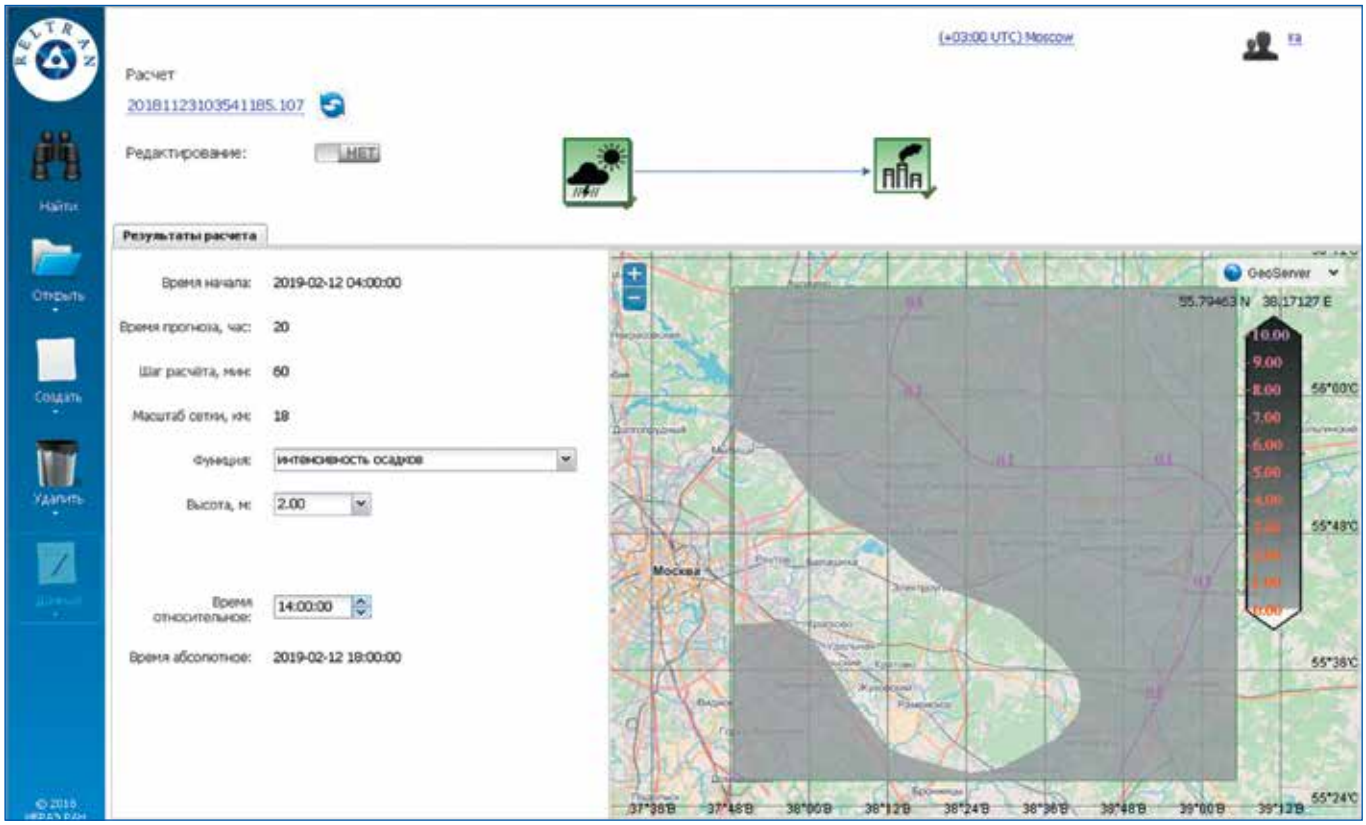


Рисунок 2.3.1 — Пример применения БЭК в программном комплексе RELTRAN

Единое хранилище географической информации, созданное с возможностью использования современных средств ее отображения, позволяет группам разработчиков тематического ПО не отвлекаться на создание собственных картографических подложек, разносортных и занимающих, как правило, большое дисковое пространство на серверах. Используется возможность применения единообразной, **современно оформленной картографической основы**, хранящейся в векторном виде, которую можно масштабировать без ущерба визуализации, к которой можно привязывать вновь создаваемые географические слои проектной тематики. Это дает организации положительный эффект в производительности труда (время, ресурсы).

4. За 2019 год все реализуемые в Отделении проекты по созданию специализированного информационно-аналитического и расчетного программного обеспечения были переведены на программно-определенную сервис-ориентированную архитектуру Software-Defined Architecture (SDA).

Сервис-ориентированная архитектура (СОА) — это модульный подход к разработке программного обеспечения, основанный на использовании распределенных, слабо связанных, заменяемых компонентов, оснащенных стандартизированными интерфейсами для взаимодействия по стандартизированным протоколам. Интерфейсы компонентов в СОА инкапсулируют детали реализации от остальных компонентов, обеспечивая, таким образом, независимость от используемых платформ и инструментов разработки. Это способствует масштабируемости и управляемости создаваемых систем, позволяет комбинировать и многократно использовать компоненты для построения сложных распределенных систем.

Очередным этапом развития СОА является Software-Defined Architecture (SDA), которая обеспечивает большую гибкость путем введения слоя виртуализации между компонентами программного обеспечения и пользователями. В рамках SDA пользователи, приложения (UI) и сервисы взаимодействуют через сервисную шину (Service Virtualization Gateway или Enterprise Service Bus), что позволяет каждому компоненту системы «не знать» о расположении и особенностях реализации других компонентов.

На рисунке 2.3.2 приведена иллюстрация развития архитектуры программного обеспечения. В настоящее время программный инструментарий ИБРАЭ РАН соответствует современному уровню развития технологий разработки ПО. Переход на SDA-архитектуру облегчает

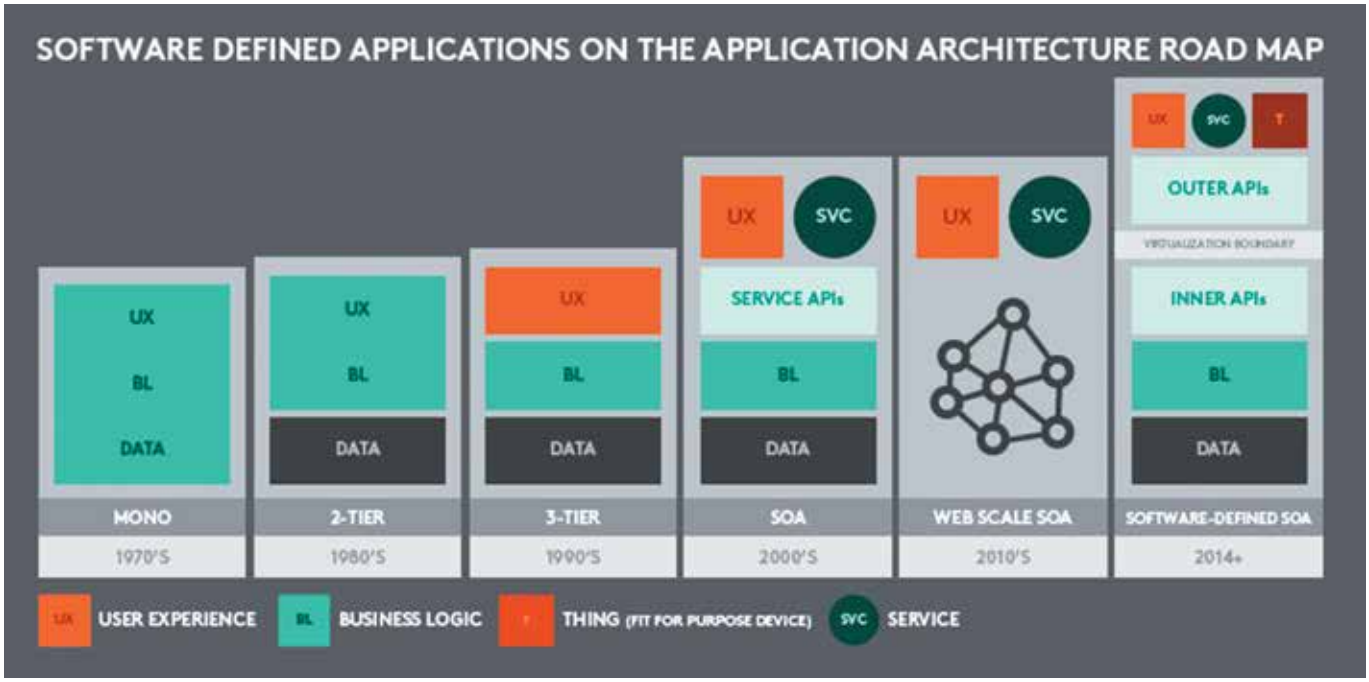


Рисунок 2.3.2 – Эволюция архитектуры ПО

наращивание функциональности существующих в ИБРАЭ РАН информационных систем и программных комплексов, а также позволяет компоновать логику приложения под совершенно разные задачи.

5. В 2019 году в отделении проведены работы по переходу на полностью бесплатное программное обеспечение для информационно-измерительной платформы «Веди», разработанной в ИБРАЭ РАН.

Подготовлены документы для внесения указанной платформы **в реестр российского программного обеспечения.** «Веди» — это программная платформа для унифицированного сбора, обработки и передачи значений измеряемых параметров. Предназначена для создания на ее основе территориальных и объектовых систем мониторинга радиационных, химических, технологических, метеорологических и других параметров.

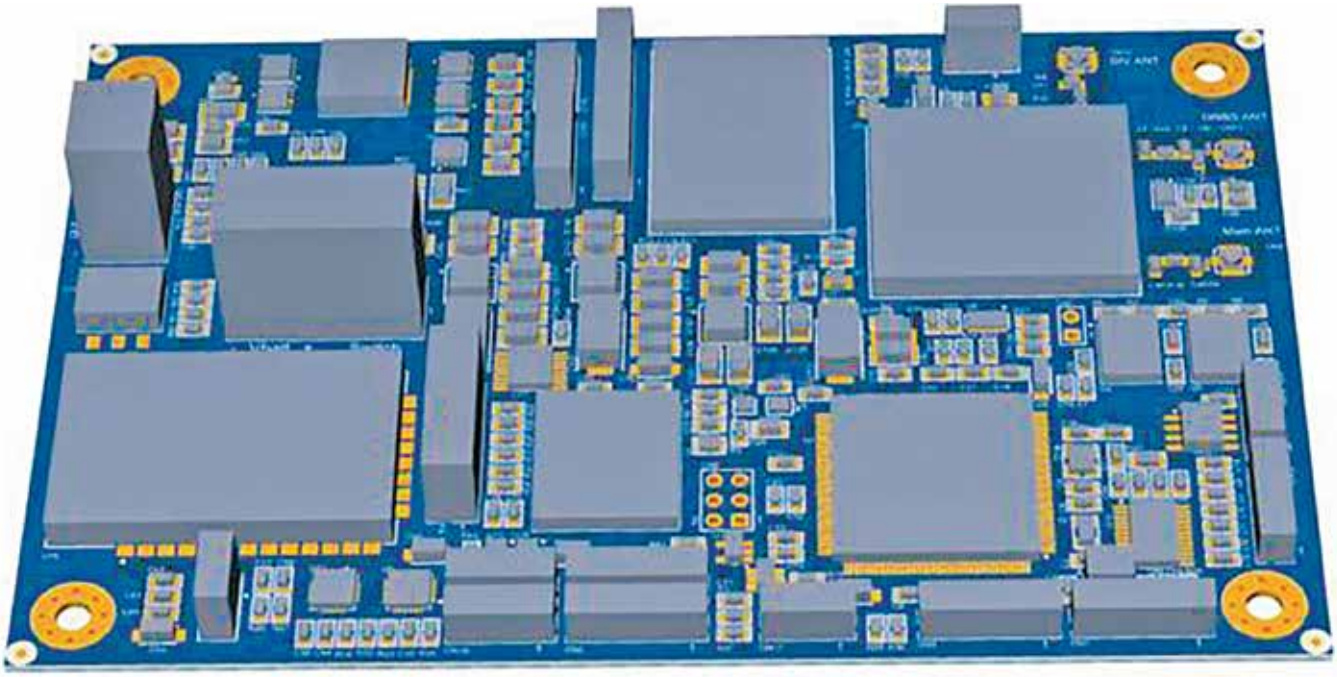


Рисунок 2.3.3 – 3D вид универсального контроллера

Рисунок 2.3.4 — Визит представителей Национального управления по ядерной безопасности Министерства энергетики США (DOE/NNSA) в ЦНТП ИБРАЭ РАН

6. В 2019 году разработан универсальный контроллер общего назначения с малым уровнем энергопотребления, который предназначен для использования в любых устройствах, выполняющих мониторинг параметров безопасности и передачу данных.

Разработано специальное программное обеспечение для указанного универсального контроллера (см. рис. 2.3.3), которое выполняет его настройку, опрос подключенных к нему датчиков, отображение данных на дисплее, хранение архива и обеспечивает гарантированную доставку данных.

7. Международная деятельность в 2019 году

1. Участие в рабочей группе **OECD NEA** по вопросам аварийной готовности и реагирования (WPNEM) — работа в экспертной группе по сравнению доз при моделировании атмосферного переноса (EGDP).

2. Обеспечение научно-технической поддержки Росатома и МИД России в Глобальной инициативе по борьбе с актами ядерного терроризма (**GICNT, ГИБАЯТ**) и участие в семинаре по вопросам реагирования на акты радиологического терроризма в рамках ГИБАЯТ.

3. Научно-техническая поддержка ДЯРБ на российско-скандинавском семинаре по сотрудничеству в области аварийной готовности.

4. Участие в девятом техническом совещании Комитета МАГАТЭ по нормам аварийной готовности и реагирования (**EPReSC**).

5. Участие во втором техническом совещании участников проекта **OECD NEA** по анализу данных обследования контейнментов и реакторных зданий АЭС «Фукусима-1».

6. Участие в техническом совещании МАГАТЭ по достижениям в части технологий в области аварийной готовности и реагирования.

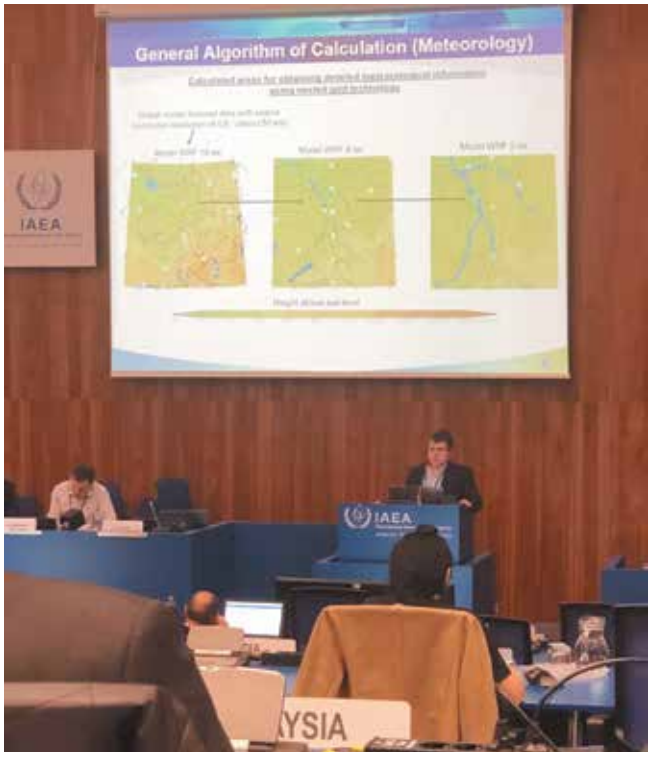


Рисунок 2.3.5 — А. А. Киселев делает доклад о современных системах моделирования распространения РВ на совещании в МАГАТЭ (апрель 2019)

Рисунок 2.3.6 — С. Н. Красноперов принимает участие в панельной дискуссии ГИБАЯТ в качестве модератора (октябрь 2019)

КЛЮЧЕВЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАБОТ:

1. *R. Yu. Ignatov, M. Yu. Zaichenko, M. A. Tolstykh, K. G. Rubinshtein, M. M. Kurbatova* Comparison of Regional Atmospheric Model Forecasts under Different Initial and Boundary Conditions. (NSI RAS). ISSN 1068-3739, Russian Meteorology and Hydrology, 2019, Vol. 44, No. 6, pp. 378—383. Allerton Press, Inc., 2019. DOI: 10.3103/S1068373919060025, Web of Science. http://apps.webofknowledge.com/full_record.do?product=WOS&search_mode=GeneralSearch&qid=1&SID=F5DJ64ch7V4sJwxb9D5&page=1&doc=1

2. *Арутюнян Р. В., Бакин Р. И., Киселёв А.А., Красноперов С. Н., Шведов А. М., Шикин А. В., Шинкарёв С. М.* Об использовании дозовых коэффициентов в программных комплексах оценки и прогнозирования радиационной обстановки при аварийных ситуациях // Радиация и риск. — 2019. — Том 28. — № 1. — С. 92—102, DOI: 10.21870/0131-3878-2019-28-1-92-102, Scopus. https://elibrary.ru/item.asp?id=37109404

3. *Гаврилов С. Л., Шикин С. А., Шикин А. В., Долгов В. Н., Арон Д. В., Киселев А. А., Красноперов С. Н., Меркушов В. П., Серебряков Е. Л.* Оценка радиационной обстановки, параметров источника выброса и выпадений Cs-137 при радиационном инциденте в г. Электросталь на основе первичного радиационного обследования и расчетного анализа. М.: АНРИ. — № 1 (96) — 2019. — С. 27—36. https://elibrary.ru/item.asp?id=37186231

4. *Бакин Р. И., Зарянов А. В., Ильичев Е. А., Киселев А. А., Красноперов С. Н., Меркушов В. П., Припачкин Д. А., Шикин А. В.* Программное средство для оценки источника выброса в атмосферу радиоактивных газов и аэрозолей при демонтаже или разрушении зданий и сооружений, загрязнённых радиоактивными веществами. // Радиоактивные отходы. — № 3 (8). — 2019. — С. 91—102. DOI6 10.25283/2587-9707-2019-3-91-102. https://elibrary.ru/item.asp?id=40876951

5. *Рубинштейн К. Г., Зароченцев Г. А., Игнатов Р. Ю., Бычкова В. И., Володина Е. М., Яковлев Н. Г., Грицун А. С.* Региональная модель динамики атмосферы для системы численного моделирования климата Арктики. // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. — 2019. — № 3 (373) — С. 60—72. https://elibrary.ru/item.asp?id=41102611

6. *Арон Д. В., Гаврилов С. Л., Киселев А. А., Шведов А. М.* Восстановление плотности поверхностного загрязнения почвы радионуклидами по данным аэрогаммасъемки. // Атомная энергия. — Т. 126. — Вып. 6. — Июнь 2019. WoS.https://elibrary.ru/item.asp?id=38496913

7. *Гаврилов С. Л., Киселев А. А., Пименов А. Е., Шведов А. М.* Определение мощности дозы гамма-излучения с помощью детектора NaI (Tl) при измерениях методом аэрогаммасъемки. — АНРИ. — № 4 (99) — 2019. — С. 18—26. https://elibrary.ru/item.asp?id=41497817

2.4. РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ АЛГОРИТМЫ

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ НАПРАВЛЕНИЯ

Научный руководитель ИБРАЭ РАН

Л. А. Большов

академик РАН
(bolshov@ibrae.ac.ru)

Заведующий отделом

В. М. Головизнин

д.ф.-м.н.
(gol@ibrae.ac.ru)

КЛЮЧЕВЫЕ СПЕЦИАЛИСТЫ:

В. Ю. Глотов, к.ф-м.н. — моделирование процессов турбулентного переноса и перемешивания

В. Г. Кондаков, к.ф-м.н. — математическое моделирование стратифицированных течений со свободной поверхностью

А. А. Канаев, к.ф-м.н. — моделирование многофазных турбулентных течений

Е. Ф. Митенкова, к.ф-м.н. — нейтронно-физические расчеты

А. В. Соловьев, к.ф-м.н. — моделирование турбулентных течений, вычислительная океанология, разработка компьютерных кодов

О. С. Сороковикова, д.ф-м.н. — зав. лабораторией суперкомпьютерного моделирования и программных комплексов

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ:

1 РАЗРАБОТКА ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ, СОВРЕМЕННЫХ ЭФФЕКТИВНЫХ ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ АЛГОРИТМОВ И КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ:

- МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИКИ И ТЕПЛО-МАССООБМЕНА ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ПРОБЛЕМАМ ОБОСНОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ АТОМНЫХ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК;
- ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ В ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ, ВКЛЮЧАЯ МЕЗОМАСШТАБНЫЙ АТМОСФЕРНЫЙ ПЕРЕНОС, ПЕРЕНОС В ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКЕ, В ОТКРЫТОЙ И ЗАКРЫТОЙ ВОДНОЙ СРЕДЕ, В ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПОРОДАХ.

2 РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ:

- ПАРАМЕТРОВ АКТИВНЫХ ЗОН ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ И ХАРАКТЕРИСТИК ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРЕЦИЗИОННЫХ МЕТОДОВ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ;
- ЗАДАЧ ВОДОРОДНОЙ ВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТИ, В ТОМ ЧИСЛЕ НА ОБЪЕКТАХ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ;
- ЗАДАЧ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ГИДРОДИНАМИКИ.

ОСНОВНЫЕ ИТОГИ 2019 ГОДА:

1. В области моделирования водородной взрывобезопасности

Выполнен **детальный численный анализ экспериментов H2P1_0 (HYMERES2), HP1_8, HP2_0, HP2_1 (HYMERES)** по распространению, перемешиванию и стратификации газовых смесей в многобоксовой крупномасштабной экспериментальной установке PANDA, в том числе:

- изучен **тепловой эффект**, который пассивные автокаталитические рекомбинаторы водорода могут оказывать на перемешивание атмосферы внутри защитной оболочки АЭС в условиях интенсивной конденсации пара на стенках ЗО (рис. 2.4.1);
- изучено **влияние излучения на процессы теплопереноса и стратификации атмосферы** в условиях высокого паросодержания;
- изучено **влияние конвективных потоков при конденсации пара на поверхности теплообменника** (вертикального конденсатора) на процессы переноса и перемешивания газов;
- изучено **влияние препятствий различной конфигурации** (рис. 2.4.2) на пути распространения струи на процесс разрушения стратификации легкого газа.

Проведена **адаптация кода CABARET-SC1** для моделирования сверхзвуковых течений сжимаемых газовых смесей при больших перепадах давления и плотности. Проведены валидационные расчеты (рисунок 2.4.3) недорасширенных струй при числах нерасчетности струи 1,42 и 3,57 (эксперименты C. D. Donaldson and R. S. Snedeker) и расчеты задач по истечению водорода из сосудов высокого давления.

Для совершенствования численного подхода КАБАРЕ, лежащего в основе программного кода CABARET_SC, предложен **новый алгоритм обработки по обработке звуковых точек** в рамках подхода КАБАРЕ. Предложенный подход повышает надежность расчета задач с сильными перепадами давлений и скоростей. Результаты работы опубликованы в профильном журнале [2].

2. В области моделирования течений со свободной поверхностью

- Разработана **модель двумерной несжимаемой среды** со свободной поверхностью на

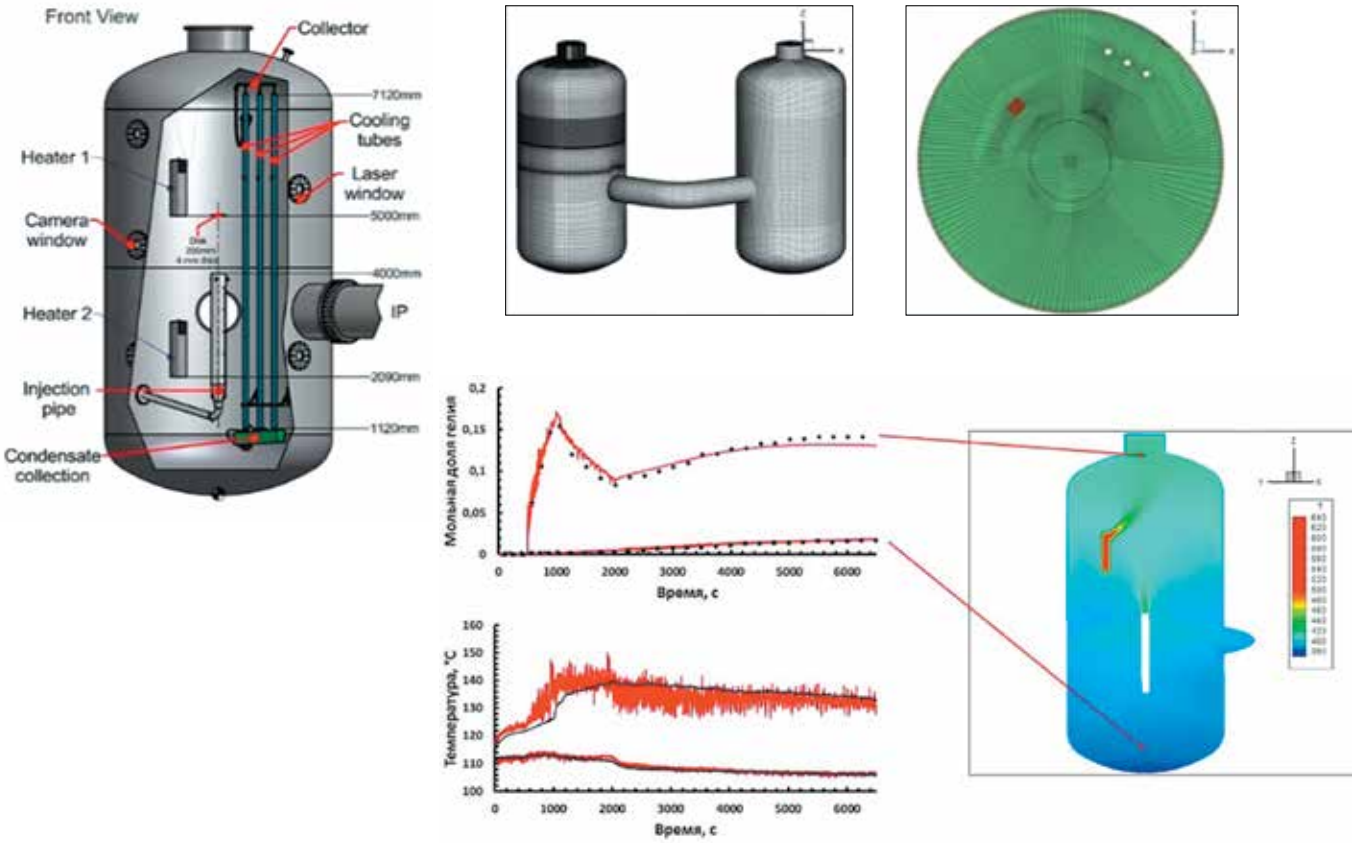


Рисунок 2.4.1 — Моделирование эксперимента по изучению теплового эффекта работы рекомбинатора водорода: схема экспериментальной установки, результаты моделирования

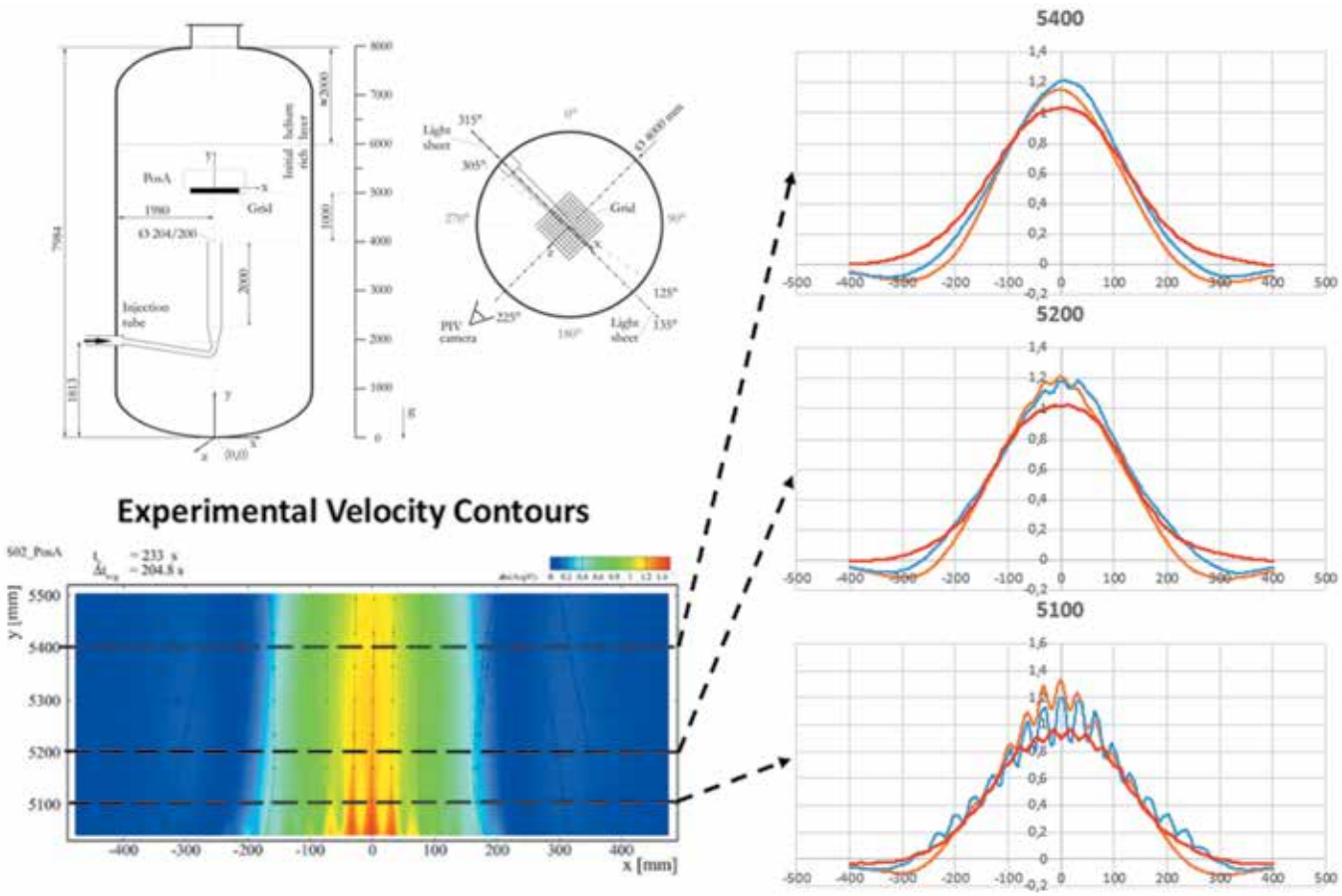


Рисунок 2.4.2 — Моделирование влияния препятствия в виде горизонтальной решетки на пути распространения струи на процесс разрушения стратификации легкого газа: схема экспериментальной установки, результаты моделирования

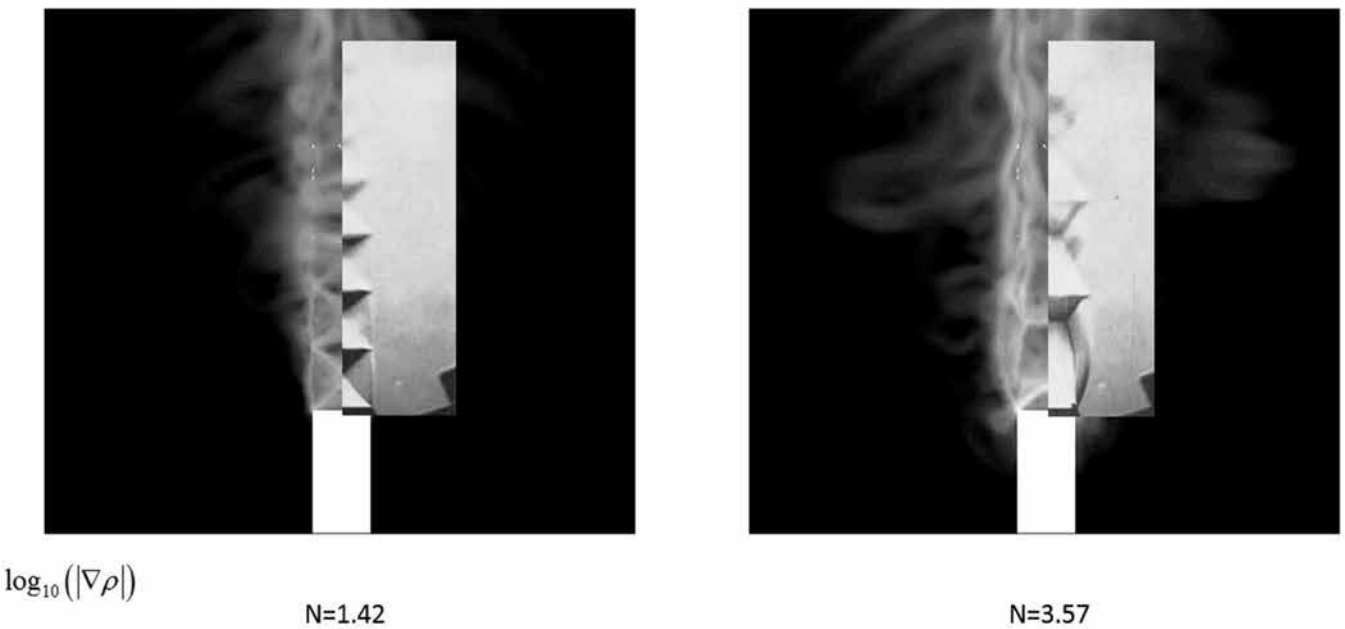


Рисунок 2.4.3 — Сравнение ударно-волнового участка недорасширенных струй в расчетах по коду CABARET-SC1 и в экспериментах

основе схемы КАБАРЕ, проведена **верификация разностной схемы с методикой МЕРАНЖ** на примере задач со всплытием вихревой пары при различных значениях чисел Рейнольдса и Фруда [3,4,5].

- Разработана **разностная схема** в приближении слабо сжимаемой среды в задаче со свободной поверхностью; схема верифицирована на задачах с ундулярной борой и осцилляциями синусоидальных волн в стакане [6].

3. В области моделирования турбулентных течений жидкостей:

Реализована модель турбулентного атмосферного течения на базе уравнений Навье-Стокса в рамках модели турбулентности Лаундера–Сполдинга с пристеночными функциями, зависящими от стратификации атмосферного фронта. Получен РИД «Программа параллельного расчета трехмерного турбулентного течения воздуха в приближении слабой сжимаемости среды в условиях городской застройки».

4. В области создания методологий решения уравнений гиперболического типа при наличии больших градиентов и внедрения разработанных методик, численных схем, программных комплексов в практику:

- Завершена аттестация программного комплекса **РОУЗ.** Это многофункциональный программный комплекс для расчета в RANS приближении как трехмерных метеорологических полей в расчетной области с открытыми границами, так и дозиметрических моделей от облака произвольной нестационарной конфигурации.

- Доработана **модель расчета водных потоков** в приближении Сен-Венана с учетом произвольной геометрии дна и береговой линии. Модель можно с успехом использовать в том числе при анализе аварийных ситуаций в случае прорывных явлений на гидротехнических сооружениях. Разработанная модель объединяет достоинства балансно-характеристических методик по типу КАБАРЕ для решения гиперболических уравнений с преобладающей адвекцией и схем по типу Годунова для так называемых «звуковых точек».

- Для уравнений динамики донных отложений гиперболического типа создана **методология проведения расчетов с высокой точностью и надежностью**. Построено несколько аналитических разрывных решений и продемонстрированы преимущества созданной методологии.

- Разработана **3D модель распространения примеси в водной среде** в растворенной и аэрозольной форме с учетом динамики донных отложений, процессов срыва, взмученности.

5. В области разработки новых подходов к численному моделированию задач геофизической гидродинамики:

- Построено иерархическое семейство моделей, описывающих **динамику течения жидкости со свободной поверхностью в гидростатическом приближении**. Наиболее общая модель описывает трехмерное движение жидкости в послойно интегрированной форме. При решении задач на сфере традиционное применение уравнения сохранения импульса в сферических координатах сопряжено с проблемой вырождения системы координат вблизи полюсов.

  Предложен новый подход, предусматривающий отказ от сферической системы координат и использование уравнения сохранения момента импульса в декартовой системе. На основе такого подхода построена дифференциально-разностная система уравнений, описывающая динамику жидкости на неоднородной вращающейся сфере, а затем построена разностная схема семейства «КАБАРЕ». Построенная разностная схема «КАБАРЕ» реализована в виде MPI распараллеленного программного комплекса и **исследована на ряде тестовых задач**. Показано высокое качество нового численного алгоритма и его **пригодность для решения задач динамики морей и океанов**.

- Реализована **модель течений внутренних волн** в несжимаемой сильно стратифицированной среде на примере задачи со схлопыванием пятна однородной жидкости [7,8].

6. В области проведения связных расчетов «нейтроника–теплогидравлика»:

- Рассмотрены особенности формирования согласованной расчетной модели в связных расчетах «нейтроника–теплогидравлика» с применением нейтронно-физических кодов, базирующихся на методах Монте-Карло.

- Проведены **расчеты реакторных систем с водяным и жидкометаллическим теплоносителем** на базе нейтронно-физического кода MCU и теплогидравлических кодов HYDRA-IBRAE и OpenFOAM.

КЛЮЧЕВЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАБОТ:

1. *Kanaev A. A., Glotov V. Yu., Goloviznin V. M., Kondakov V. G., Kiselev A. E.* Mathematical modelling of hydrogen safety problems with CABARET scheme // Расширенные тезисы доклада SCTEMM-2019 (Journal of Physics: Conference Series (Web of Science, Scopus)) https://doi.org/10.1088/1742-6596/1392/1/012039.

2. *Данилин А. В., Соловьев А. В.* Модификация схемы Кабаре для разрешения звуковых точек в газовых течениях // Вычислительные методы и программирование. —2019. — Т. 20. — С. 481—488. https://num-meth.srcc.msu.ru/zhurnal/tom_2019/pdf/v20r442.pdf.

3. *Gushchin V. A., Kondakov V. G.* (2019). On One Method for Solving of a Non-stationary Fluid Flows with Free Surface // In: Dimov I., Farago I., Vulkov L. (eds) Finite Difference Methods. Theory and Applications. FDM 2018. Lecture Notes in Computer Science, vol. 11386. Springer, Cham https://doi.org/10.1007/978-3-030-11539-5_30.

4. *Gushchin V. A., Kondakov V. G.* On the Cabaret Scheme for Incompressible Fluid Flow Problems with a Free Surface // Math Models Comput Simul (2019). 11: 499. https://doi.org/10.1134/S2070048219040082.

5. *Дзама Д. В., Сороковикова О. С.* Верификация математической модели расчета мощности эффективной дозы облучения от загрязненной почвы и стен зданий с учетом экранирования. // Атомная энергия. — 2019. — Т. 126. — № 6. — С. 337—340.

6. *Дзама Д. В., Семенов В. Н., Сороковикова О. С., Фокин А. Л.* Методика расчета радиационной обстановки при аварийных атмосферных выбросах на АЭС с использованием реальных метеорологических данных // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. — 2019. — № 3. — С. 36—44.

7. *Sorokovikova O. S., Dzama D. V., Asfandiyarov D. G.* Probabilistic models of pollution of the surface waters of large marine areas. // 2019. J. Phys.: Conf. Ser. 1392 012032. doi:10.1088/1742-6596/1392/1/012032.

8. *Cherepanov A. A., Sorokovikova O. S.* Models of dynamics of contamination propagation in surface waters using simulation of hydrodynamical processes of different level of complexity. // 2019. J. Phys.: Conf. Ser. 1392 01203. doi:10.1088/1742-6596/1392/1/01203.

9. *Asfandiyarov D. G.* Numerical modelling of wall-bounded turbulent flows based on the CABARET scheme // 2019. J. Phys.: Conf. Ser. 1392 012030. doi:10.1088/1742-6596/1392/1/012030.

10. *Асфандияров Д. Г.* Искусственные граничные условия при ILES моделировании течения в плоском канале по схеме КАБАРЕ // Вычислительные методы и программирование. — 2019. — Т. 20. — С. 12—20. DOI: 10.26089/NumMet.v20r102.

11. *Асфандияров Д. Г.* Математическое моделирование турбулентного течения в плоском канале на основе схемы КАБАРЕ // Вычислительные методы и программирование. — 2019. — Т. 20. — С. 356—362. DOI: 10.26089/NumMet.v20r431.

12. *Sergeenko K. M., Goloviznin V. M., Glotov V. Y.* LES Simulation of Heat Transfer in a Turbulent Pipe Flow with Lead Coolant at Different Reynolds Numbers // Mathematical Models and Computer Simulations. Vol. 11, Issue 2. 1 March 2019. Pp. 176—189.

13. *Glotov V. Yu., Goloviznin V. M., Kanaev A. A., Kondakov V. G., Kiselev A. E.* CABARET scheme for modelling the stratification erosion in gas mixtures in hydrogen mitigation experiments for reactor safety // 4th All-Russian Scientific Conference Thermophysics and Physical Hydrodynamics with the School for Young Scientists. Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1359. Conference 012013. DOI: 10.1088/1742-6596/1359/1/012013.

14. *Соловьев А. В., Данилин А. В.* Использование схемы ДИЕЗ повышенного порядка точности для решения некоторых нелинейных гиперболических систем уравнений // Вычислительные методы и программирование: новые вычислительные технологии. 2019. — Т. 20. — № 1. — С. 45—53.

15. *Goloviznin V. M., Solovjev A. V., Zalesny V. B.* Verification of the Cabaret schemes for the shallow water equations based on the conservation of angular momentum // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol.1392. Conference 012046., DOI:10.1088/1742-6596/1392/1/012046.

16. *Митенкова Е. Ф., Новиков Н. В., Соловьева Е. В.* Бенчмаркинг для современных нейтронно-физических кодов // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные костанты. — 2019. — № 2. — С. 20—30.

17. *Митенкова Е. Ф., Семенова Т. В.* Счет функций распределения нейтронов в плоских системах с протяженными неоднородными топливными областями // Атомная энергия. — 2019. — Т. 126. — № 1. — С.15—19.

18. *Семенова Т. В., Митенкова Е. Ф., Соловьева Е. В.* Матрица деления в программе TDMCC для расчета слабосвязанных систем // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. — 2019. — № 2. — С. 31—37.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

Директор
ИБРАЭ РАН

Л. В. Матвеев

д.ф.-м.н.

(matweev@ibrae.ac.ru)

Заведующий
лабораторией

П. С. Кондратенко

д.ф.-м.н.

(kondrat@ibrae.ac.ru)

КЛЮЧЕВЫЕ СПЕЦИАЛИСТЫ:

А. Р. Аветисян, к.ф.-м.н. — вычислительная гидродинамика

А. Я. Буринский, д.ф.-м.н. — гравитация и физика элементарных частиц

А. Д. Васильев, к.ф.-м.н. — вычислительная физика

Ю. Н. Обухов, к.ф.-м.н. — квантовая теория поля и инновационные ядерные технологии

Е. В. Ткаля, д.ф.-м.н. — ядерная и атомная физика, физика твердого тела и лазерная физика

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ:

1. НЕКЛАССИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПЕРЕНОСА ПРИМЕСИ В СИЛЬНО НЕОДНОРОДНЫХ СРЕДАХ, ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ПРОБЛЕМЕ ЗАХОРОНЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ В ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДАХ
2. МОДЕЛИ СОПРЯЖЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА, ГИДРОДИНАМИКИ И ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ ДЛЯ ПРОБЛЕМЫ ИЗОЛЯЦИИ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ
3. МОДЕЛИ КЛАССИЧЕСКИХ И КВАНТОВЫХ ЧАСТИЦ С ДИПОЛЬНЫМИ МОМЕНТАМИ ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ С СИСТЕМАМИ ЧАСТИЦ СО СПИНОМ, ВКЛЮЧАЯ ГРАВИТАЦИОННЫЕ, ИНЕРЦИАЛЬНЫЕ, ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЭФФЕКТЫ С НЕЙТРОНАМИ И АТОМАМИ
4. ИССЛЕДОВАНИЕ КВАНТОВЫХ УРОВНЕЙ ЗАРЯЖЕННЫХ КЛАСТЕРОВ, ВКЛЮЧАЯ ФУЛЛЕРЕНЫ, ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ ПО СОЗДАНИЮ НОВЫХ КОГЕРЕНТНЫХ ИСТОЧНИКОВ В КОРОТКОВОЛНОВОМ ДИАПАЗОНЕ СПЕКТРА
5. ПРОБЛЕМЫ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

ОСНОВНЫЕ ИТОГИ 2019 ГОДА:

1. Неклассические процессы переноса

Установлены закономерности переноса примеси в трещиновато-пористой среде, содержащей редкие случайно расположенные сорбирующие включения. Описаны режимы переноса в зависимости от трещиноватости среды, характерных размеров блоков и их пористости, а также доли объема, занимаемого включениями, и коэффициента сорбции в них. Указаны условия, при которых наличие сорбирующих включений существенно влияет на режимы переноса (рис. 2.4.4). Рассчитаны характеристики процессов переноса, как для основной области концентрации примеси, так и на асимптотически больших расстояниях от источника примеси.

Предложена теория переноса примеси в статистически однородных резко контрастных средах в случае, когда источник примеси окружен заградительным барьером, состоящим из слабопроницаемой матрицы и редких линейных дефектов («проколов»), способствующих быстрому, но малоинтенсивному проходу примеси через барьер. Действие барьера приводит к возникновению концентрационного предвестника в основной среде и модификации асимптотик в пространственном распределении концентрации.

Разработан новый алгоритм расчета процессов переноса примеси (включая неклассические режимы) в статистически однородных резко контрастных средах.

Разработан алгоритм расчета коллоидно усиленных процессов переноса примеси (включая неклассические режимы) в двухпористых средах. Верификация алгоритма проведена путем сравнения результатов пробных расчетов с аналитическими выражениями в предельных временных интервалах.

Предложен метод решения задачи о процессах переноса примеси в неоднородной среде, обусловленных классическими механизмами диффузии и адвекции. В отсутствие адвекции задача сведена к решению дифференциального уравнения первого порядка, которое определяет возникающую при таком подходе линейную траекторию концентрационного сигнала от источника до точки наблюдения — аналог луча в геометрической оптике. Решение задачи в присутствии адвекции получено путем перехода в систему координат, сопутствующей адвекции. Ключевыми элементами, вошедшими в полученное выражение для концентрации, являются эффективное время и величина смещения примеси, обусловленные адвекцией.

2. Модели сопряженных процессов теплообмена, гидродинамики и фазовых переходов

Разработана математическая модель сопряженных процессов теплообмена, гидродинамики и фазовых переходов с учетом эффектов теплового и проникающего излучений при изоляции радиоактивных отходов методом самопогружения. Модели основаны на применении гладкой функции-индикатора фаз для описания процессов фазовых переходов (плавления/отвердевания). Такой подход обеспечил раз-

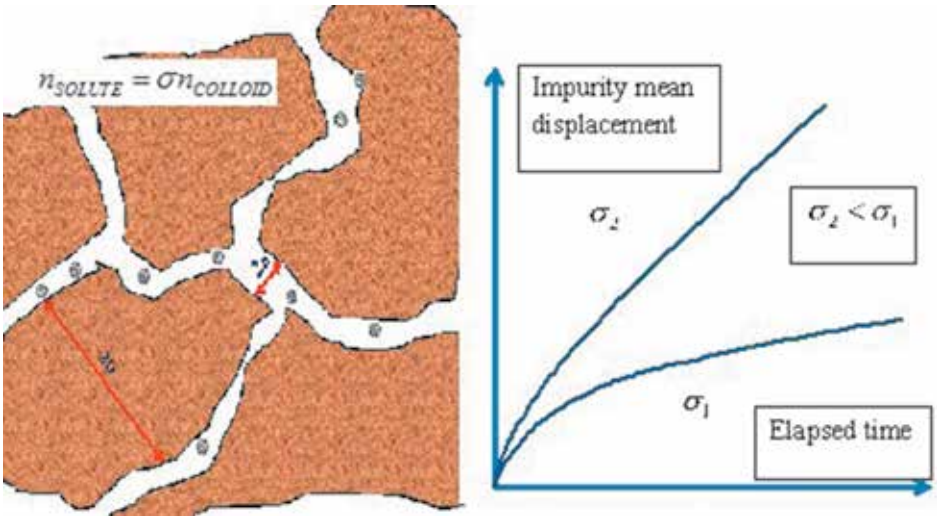


Рисунок 2.4.4 — Среднее смещение примеси в зависимости от времени при двух значениях параметра, определяющего сорбционную способность коллоидов

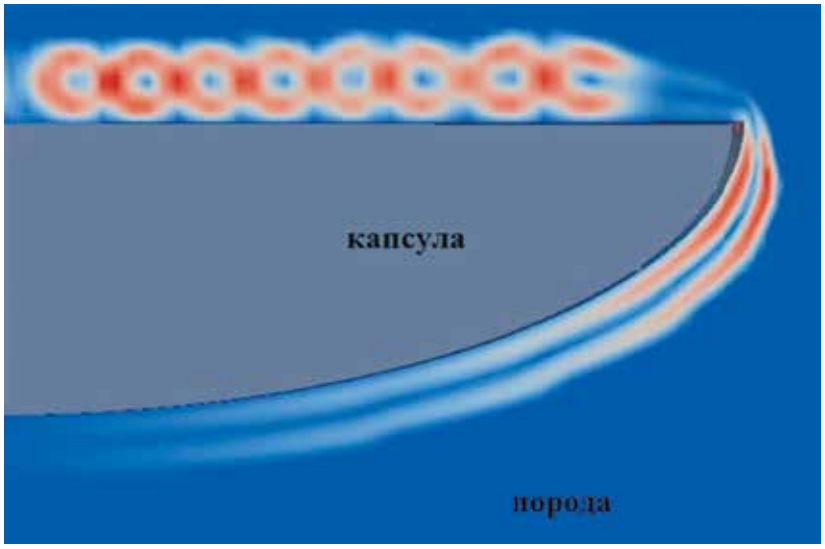


Рисунок 2.4.5 – Распределение модуля скорости расплава вокруг капсулы с РАО в форме сферического сегмента на начальном этапе погружения

работку численного метода «сквозного» счета для дискретизации системы уравнений модели. Разработанные модели и методы были реализованы и верифицировались в программном комплексе MELT-GEO2.0. Проводились **расчеты для определения режима погружения устройства с радиоактивными отходами**, предложенного ранее в ИБРАЭ РАН (Рис. 2.4.5). Показана работоспособность данного устройства. Разработанные модели и программный комплекс являются практически важными **для обоснования надежности захоронений радиоактивных отходов в геологических средах**.

3. Закономерности движения частиц, обладающих внутренней структурой, во внешних полях

С учетом того факта, что по геодезическим линиям движутся только бесструктурные частицы и пробные тела, а при наличии спина и других микроструктурных свойств траектория существенно отличается от геодезической, выведено новое уравнение девиации для траекторий частиц со спином и сложной структурой моментов на основе метода мировой функции Синга, который позволяет на всех этапах сохранять явную ковариантность теории. Полученные новые результаты являются **теоретическим базисом для обобщения конструкции гравитационного компаса**.

4. Электронные спектры заряженных фуллеренов

Комбинируя аналитические и численные методы, **показано существование объемно-локализованных квантовых уровней электронов** в диапазоне энергий от 1 до 100 эВ в рамках физических моделей потенциала самосогласованного поля заряженного фуллерена. С использованием вычислительных 3D пакетов подтверждено хорошее качественное соответствие результатов с расчетами по простой сферической модели. Последующее изучение характеристик квантовых переходов в заряженных фуллеренах представляет значительный интерес для решения практических задач по созданию новых когерентных источников в коротковолновом диапазоне длин волн.

5. Новые процессы в низкоэнергетической ядерной физике

Предложен **высокоэффективный процесс** возбуждения низколежащего изомерного состояния $3/2^+$(8.3 эВ) в ядре ^{229}Th фотонами по механизму электронного моста через атомную оболочку с промежуточными состояниями в непрерывном спектре (рис. 2.4.6, 2.4.7).

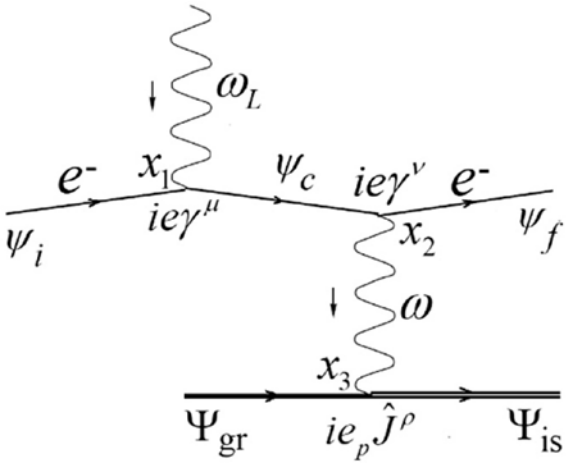


Рисунок. 2.4.6. – Диаграмма Фейнмана для электронного моста

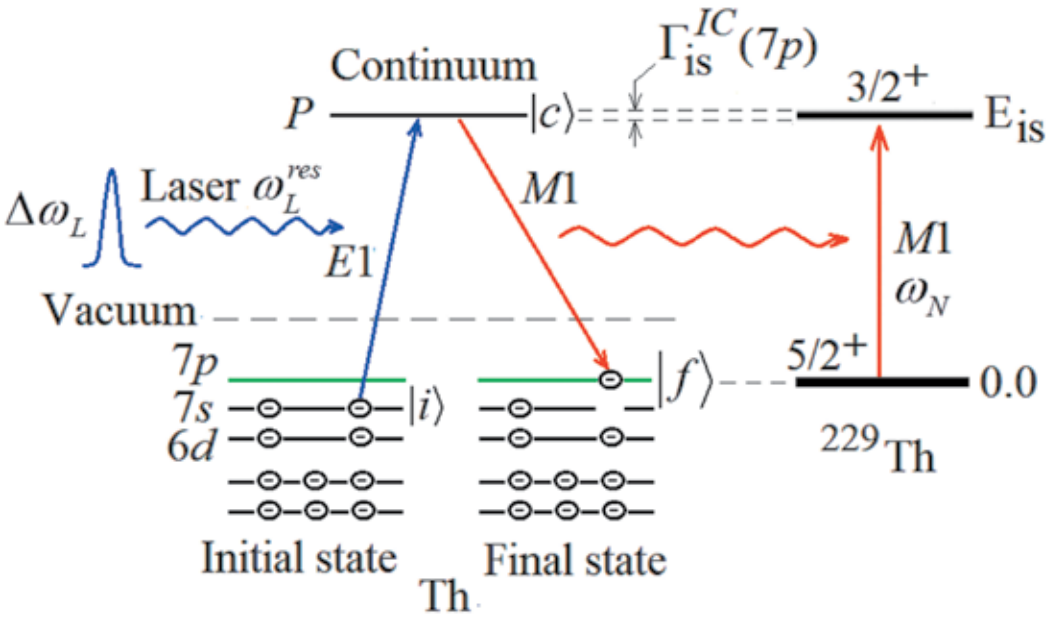


Рисунок 2.4.7 – Возбуждение ядра фотонами в процессе электронного моста через состояния непрерывного спектра

Такой процесс позволяет осуществить резонансное возбуждение ядра независимо от схемы уровней атома (иона).

Показано, что в ридберговском атоме (ионе) тория распад изомера ^{229m}Th (3/2$^+$, 8.3 эВ) по каналу внутренней конверсии (рис. 2.4.8) происходит только через ридберговский электрон и может быть существенно замедлен. Уже при относительно небольших значениях главного квантового числа и орбитального момента ридберговского состояния вероятность конверсии W_{IC} уменьшается на 9 порядков величины и становится меньше вероятности γ-излучения W_γ (рис. 2.4.9).

Рассчитана **электронная плотность на ядрах ^{7}Be**, инкапсулированных в фуллерене C_{70}. Установлено, что в молекулах $^7Be@C_{70}$ и $^7Be_2@C_{70}$ скорость K-захвата ядром ^{7}Be орбитальных электронов увеличивается по сравнению со скоростью захвата в нейтральном атоме ^{7}Be примерно на 2—2.5%. Кроме того показано, что комплекс $^7Be_2@C_{70}$ стабилен и имеет энергию связи около 1,3 эВ (рис. 2.4.10).

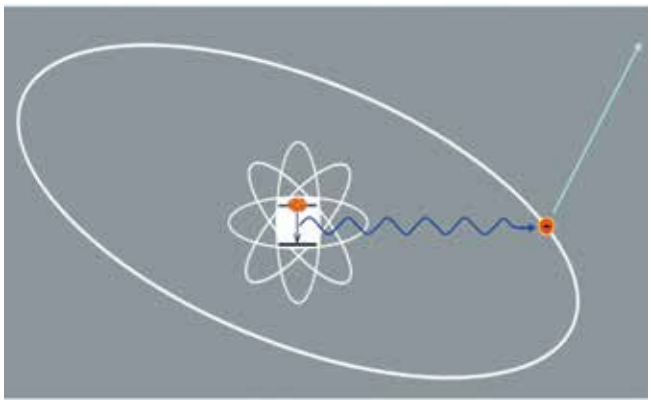


Рисунок 2.4.8 – Внутренняя конверсия через ридберговский электрон

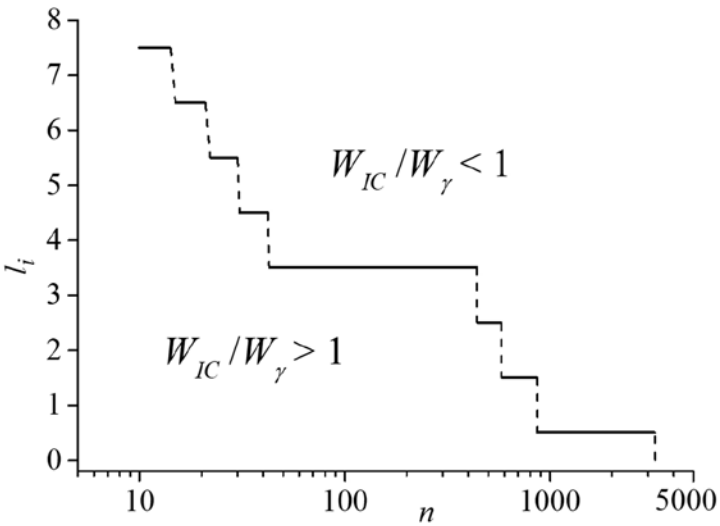


Рисунок 2.4.9 – Области доминирования двух основных каналов распада ядерного изомера как функции главного квантового числа *n* и орбитального момента l ридберговского электрона

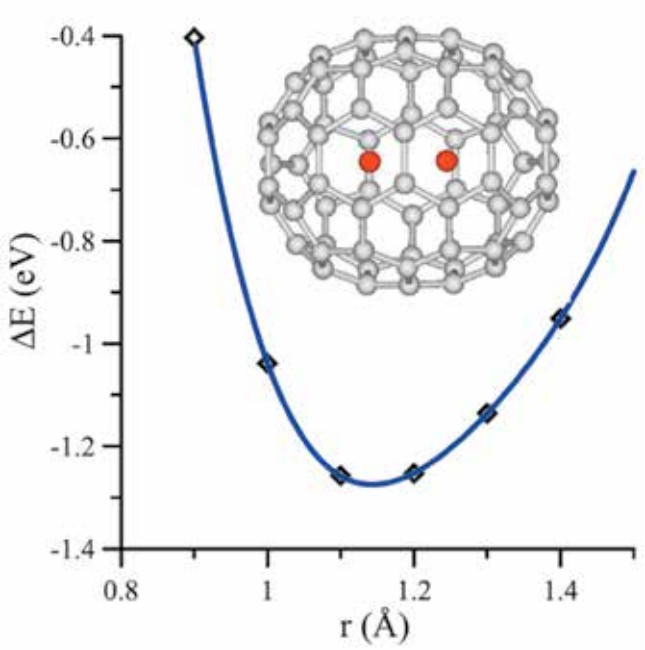


Рисунок 2.4.10 — Энергия связи комплекса как функция положения атомов Be

КЛЮЧЕВЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАБОТ:

1. *Большов Л. А., Кондратенко П. С., Матвеев Л. В.* Неклассический перенос в сильно неоднородных и резко контрастных средах // Успехи физических наук. 2019. Т. 189, в. 7. С. 691–702. DOI: https://doi.org/10.3367/UFNr.2018.08.038423.

2. *Kondratenko P. S., Matveev L. V., Vasiliev A. D.* A new algorithm for numerical modeling of impurity transport in the frame of statistically homogeneous sharply contrasting media // Russian Journal Numerical Analysis and Mathematical Modeling Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modeling. 2019. Vol. 34, № 6, P. 339–351.

3. *Кондратенко П. С., Матвеев А. Л.* Классическая адвекция-диффузия в неоднородных средах // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2020. Т. 157, в. 4, С. 703–706.

4. *Kondratenko Peter S., Kutsepalov Vladimir A., Matveev Leonid V.* Effect of randomly inhomogeneous diffusion barrier on impurity transport in a double porous medium // European Physical Journal B. Condensed Matter and Complex Systems. 2019. Vol. 92, № 9: 210 DOI: 10.1140/epjb/e2019-100290-y.

5. *Аветисян А. Р., Арутюнян Р. В., Кондратенко П. С., Матвеев Л. В., Шведов М. В.*, Математические модели сопряженных процессов теплопереноса и гидродинамики с фазовыми переходами в технологиях энергосбережения и экологической безопасности // Радиоактивные отходы. 2019. № 3 (8), С. 74–79.

6. *Obukhov Yu. N., Silenko A. J., Teryaev O. V.* Quantum spin dynamics in external classical fields // EPJ Web of Conf. 2019. Vol. 204, P. 10007.

7. *Puetzfeld D., Obukhov Yu. N.* Operational significance of the deviation equation in relativistic geodesy // "Encyclopedia of Geodesy", E. Grafarend (ed.), Encyclopedia of Earth Sciences Series. Cham: Springer. 2019. — P. 1–6.

8. *Arutyunyan R., Obukhov Yu., Vabishchevich P.* Numerical simulation of charged fullerene spectrum // Mathematical Modelling and Analysis. 2019. Vol. 24, P. 263–275.

9. *Арутюнян Р. В., Осадчий А. В.* Объемно-локализованные квантовые уровни в заряженных фуллеренах // Атомная Энергия. 2019. Т. 126, в. 4, С. 225–228.

10. *Arutyunyan R. V., Vasiliev A. D., Obukhov Yu. N., Osadchy A. V.*, Metastable one-electron excited states of charged fullerenes // Journal of Nanomaterials. 2019. 5864604.

11. *Tkalya E. V.* Decay of the low-energy nuclear ^{229m}Th isomer via atomic Rydberg states, Physical Review C. 2019. 100 (5), 054316.

12. *Bibikov A. V., Nikolaev A. N., Tkalya E. V.* Estimation of the decay rate of ^{7}Be and $^{7}Be_2$ encapsulated in C_{70} // Physical Review C. 2019. 100 (6), 064603.

3 Развитие инфраструктуры

Заместитель директора

О. В. Цацулина

(ovts@ibrae.ac.ru)

Вопросы развития инфраструктуры и создания оптимальных условий для эффективной работы научного коллектива всегда относились к приоритетным направлениям развития ИБРАЭ РАН. В 2019 году выполнены комплексы работ по:

- реконструкции систем жизнеобеспечения Института;
- развитию вычислительных и коммуникационных сетей Института;
- поддержанию в работоспособном состоянии и развитию применяемых измерительных систем.

Выполненные в 2019 году работы по поддержанию и развитию систем жизнеобеспечения включали:

- капитальную реконструкцию систем вентиляции и кондиционирования;
- реконструкцию систем пожарной сигнализации и пожаротушения;
- повышение производительности подсистем резервного энергоснабжения.

Развитие вычислительных и коммуникационных сетей Института

Отдел технического сервиса обеспечивает функционирование парка вычислительной техники, включающего в себя персональные компьютеры, рабочие станции, специализированные серверы и хранилища данных, вычислительный кластер, информационные системы, аппаратуру видеоконференцсвязи, комплекс виртуализации.

Аппаратно-программный комплекс ИБРАЭ РАН обладает следующими основными характеристиками:

- поддержка локальной компьютерной сети Института производительностью 10 гбит/с;
- распределенная система хранения данных;
- кластеры виртуализации VMware, KVM;
- кластер удаленных виртуальных рабочих мест сотрудников;
- централизованный VPN с разграничением к ресурсам ИБРАЭ РАН.

В 2019 год было приобретено и введено в эксплуатацию более 50 единиц высокопроизводительных персональных компьютеров, рабочих станций и серверов. В обеспечение их эффективного функционирования в 2019 году были закуплены или продлены ранее приобретенные лицензии, охватывающие около 30 наименований программного обеспечения.

В течение последних лет активно прорабатывались варианты развития **кластерной вычислительной установки Института**. Имеющаяся в настоящее время кластерная установка общей производительностью 10 TFlops полностью загружена научными подразделениями Института для:

- проведения комплексных мультифизичных расчетов в целях обоснования безопасности АЭС, в том числе реакторных установок на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем, разрабатываемых в рамках реализации проектного направления «Прорыв»;

- проведения расчетов в обоснование безопасности завершающей стадии жизненного цикла объектов использования атомной энергии, обращения с ОЯТ и РАО, вывода из эксплуатации объектов ядерного наследия;
- вычислительного обеспечения исследований и практических работ в области аварийного реагирования.

Своевременное обслуживание системы коммуникаций Института обеспечило в 2019 году бесперебойное функционирование всех применяемых каналов связи, включая непрерывный и надежный прием оперативной информации от ведомственных и территориальных АСКРО, данных о состоянии энергоблоков всех российских АЭС и метеоданных.

Развитие измерительных систем и оборудования

Измерительные и экспериментальные методы играют ограниченную роль в исследованиях Института. Тем не менее, по ряду направлений работ они активно применяются.

В круглосуточно действующем Центре научно-технической поддержки (ЦНТП) ИБРАЭ РАН поддерживается **постоянная готовность мобильной группы радиационной разведки**. В состав оборудования, в том числе, входят: спектрометр МКС-АТ6101С в комлектации «Backpack», оснащенный сканером-идентификатором радионуклидов, GPS-приемником и компактным ПК, с функцией автоматического гамма-сканирования территории; высокочувствительные дозиметры-радиометры МКС-17Д «Зяблик», портативные дозиметры гамма- и рентгеновского излучения ДКГ-09Д «Чиж», оснащенные сцинтилляционным детектором; портативные индивидуальные дозиметры ДКГ-РМ1610 «Полимастер».

Для передвижения группы используется **специальный автомобиль, оснащенный системой непрерывного измерения мощности дозы гамма-излучения «Гамма-сенсор» и системой передачи данных в ЦНТП ИБРАЭ РАН в режиме реального времени** (рис. 3.1).

В 2019 году Институтом был приобретен высокопроизводительный **лазерный сканер**, предназначенный для работ по объектам ядерного наследия и способный оперативно создавать трехмерные модели местности (рис. 3.2). Уже в 2019 году с его использованием осуществлено более 3 тыс. измерений на площадках предприятий атомной отрасли.

Рисунок 3.1 — Передвижная радиометрическая лаборатория ЦНТП ИБРАЭ РАН с установкой «Гамма-сенсор»

Рисунок 3.2 — Сканер для выполнения 3D лазерной съемки «Leica»

4 Международное сотрудничество

Начальник отдела

Л. Г. Шпинькова

к.ф-м.н.

(lgs@ibrae.ac.ru)

В 2019 г. ИБРАЭ РАН активно развивал сотрудничество с международными научными организациями, включая **Агентство по ядерной энергии** (АЯЭ) **Организации экономического сотрудничества и развития** (ОЭСР) и **Международное агентство по атомной энергии** (МАГАТЭ).

Сотрудники ИБРАЭ РАН представлены **в 14 комитетах и рабочих группах АЯЭ**, научный руководитель ИБРАЭ РАН академик **Л. А. Большов** — член Бюро Комитета по безопасности ядерных установок АЯЭ, **С. С. Уткин** — член Комитета по обращению с радиоактивными отходами, **Д. В. Бирюков** — член Комитета по выводу из эксплуатации ядерных установок и обращению с объектами ядерного наследия.

ИБРАЭ РАН участвует **в четырех крупных международных проектах АЯЭ** (TCOFF, HYMERES-II, RESEO, HYDROGEN-SOAR), связанных с анализом безопасности реакторных установок. В 2019 году проводилась подготовка и подача заявок совместно с Госкорпорацией «Росатом» на участие еще в четырех проектах. Эксперты ИБРАЭ РАН приняли участие в **16 совещаниях и конференциях** Агентства.

Рисунок 4.1 — Подписание Соглашения о сотрудничестве в области ядерной безопасности и радиационной защиты между ИБРАЭ РАН и ИРСН, продлевающее текущее сотрудничество на 7 лет научным руководителем ИБРАЭ РАН академиком Л. А. Большовым и генеральным директором ИРСН Ж.-К. Ниелем

Рисунок 4.2 — Подписание пятистороннего соглашения в области исследований обращения с РАО между ФГУП «НО РАО», ИБРАЭ РАН, Федеральным институтом геологических наук и природных ресурсов Германии (БГР), БГЕ Технолоджи и Обществом по безопасности установок и реакторов Германии (ГРС)

Традиционно ведется широкое сотрудничество с МАГАТЭ. В 2019 г. ИБРАЭ РАН заключил **3 новых соглашения** об участии в международных исследовательских проектах МАГАТЭ и продолжил **участие в 5 проектах** по ранее заключенным соглашениям. Проекты связаны с расчетами поведения реакторных установок и топлива (включая новые виды топлива) при тяжелых авариях, анализом защитных мер при аварийном реагировании с учетом метеорологических данных и др. Эксперты Института приняли участие в **16 совещаниях и технических семинарах МАГАТЭ**.

В 2019 г. ИБРАЭ РАН участвовал в работах по международному проекту **IVMR**, который посвящен исследованию возможности внутрикорпусного удержания расплава при аварии с плавлением активной зоны. Проект проводится в рамках европейской программы **HORIZON-2020**, в нем участвует около 30 стран.

Двусторонние контакты с иностранными научными организациями позволяют сосредоточиться на конкретных проектах научно-технического сотрудничества и обмениваться опытом при реализации научно-практических задач.

ИБРАЭ РАН поддерживает контакты с Институтом радиационной защиты и ядерной безопасности Франции (**IRSN**) по вопросам безопасности атомных объектов, аварийного реагирования и информирования. В декабре 2019 г. на полях 66-го Совещания по безопасности ядерных установок АЯЭ ОЭСР **было подписано очередное Соглашение о сотрудничестве в области ядерной безопасности и радиационной защиты между ИБРАЭ РАН и ИРСН, продлевающее текущее сотрудничество на следующие 7 лет**.

Продолжается сотрудничество с немецкими организациями (Федеральным ведомством по геонаукам и природным ресурсам (BGR) и Федеральным обществом по финальному размещению РАО (BGE)), которое предусматривает работы по обоснованию долговременной безопасности пунктов геологического захоронения РАО, а также планирование и проведение экспериментальных исследований в подземной лаборатории Нижнеканского массива (ПИЛ НКМ).

Подготовлено и в сентябре 2019 г. подписано пятистороннее соглашение между ФГУП «НО РАО», ИБРАЭ РАН, Федеральным институтом геологических наук и природных ресурсов Германии (БГР), БГЕ Технолоджи ООО (БГЕ ТЕК) и Обществом по безопасности установок и реакторов Германии (ГРС).

Продолжены консультации с Вьетнамским институтом атомной энергии ВИНАТОМ. В январе 2019 г. было подписано **Дополнение к Меморандуму о взаимопонимании между ИБРАЭ РАН и ВИНАТОМом**, расширяющее сотрудничество на область безопасности реакторных установок, анализа рисков и последствий аварийных ситуаций на радиационно опасных объектах.

Продолжались работы в рамках международных проектов в Арктической зоне, в частности,

Рисунок 4.3 – Визит вьетнамской делегации во главе с вице-губернатором провинции Донгнай господином Во Ван Тянем в ИБРАЭ РАН

совместного с итальянской компанией СОДЖИН СпА проекта по выполнению технико-экономических исследований и разработке плана действий по безопасному и надежному обращению с радиационно опасными объектами, затопленными в арктических морях.

В течение отчетного периода поддерживались контакты Института в рамках межправительственных соглашений с Комиссариатом по атомной энергии и альтернативным источникам энергии Франции, с регулирующими организациями Швеции, Финляндии и Норвегии в рамках российско-скандинавского сотрудничества по аварийному реагированию, с Российско-Французским Советом по экономическим, финансовым, промышленным и торговым вопросам, а также контакты по Глобальной инициативе по борьбе с актами ядерного терроризма. Сотрудники ИБРАЭ РАН принимали участие в соответствующих двусторонних мероприятиях и выступали с докладами.

В течение 2019 г. велась подготовка к заключению новых контрактов и соглашений: в области обращения с РАО — с БГЕ Технолоджи и Пекинским научно-исследовательским институтом геологии урана (BRIUG); в области радиоэкологических исследований — с Институтом радиоактивности окружающей среды Университета Фукусимы (IER), в области расчета радиологических последствий для режима нормальной эксплуатации и аварийных режимов АЭС «Аккую» — с компанией AKKUYU NÜKLEER ANONİM ŞİRKETİ (Турция).

ИБРАЭ РАН в 2019 г. принял несколько иностранных делегаций, в том числе:

- делегации специалистов BGR, BGE и Федерального министерства экономики и энергии ФРГ (BMWi) для обсуждения направлений и планов сотрудничества в области финальной изоляции радиоактивных отходов;
- представителей министерства энергетики США и национальных лабораторий США для обсуждения возможностей научно-технического сотрудничества в области ядерной и радиационной безопасности в мире;
- делегацию Социалистической Республики Вьетнам в связи с планами строительства при содействии России в провинции Донгнай Центра ядерной науки и технологий (ЦЯНТ).

31 января 2019 г. в ИБРАЭ РАН был организован рабочий российско-немецкий семинар по вопросам сотрудничества в области обращения с РАО. В семинаре приняли участие более 40 специалистов из научных организаций России и Германии. Были обсуждены наиболее актуальные направления сотрудничества на ближайшие три года и составлен план совместных исследований.

Рисунок 4.4 — Рабочий российско-немецкий семинар по вопросам сотрудничества в области обращения с РАО в ИБРАЭ РАН

5 Научно-образовательная и издательская деятельность

Институт уделяет большое внимание повышению профессионального уровня и квалификации своих сотрудников, подготовке молодых научных кадров, своевременной и масштабной публикации основных научных и практических результатов, полученных в ходе проводимых в ИБРАЭ РАН научных исследований, обеспечения наиболее широкого доступа для сотрудников Института к профильной научной литературе, популяризации достижений Института в области обеспечения безопасности атомной отрасли.

На регулярной основе для сотрудников Института проводятся научные семинары по теоретической и математической физике, научно-популярные лекции по различным аспектам развития атомной энергетики.

В 2019 году ИБРАЭ РАН осуществлял успешное сотрудничество с ведущими российскими и зарубежными научными издательствами (МАИК-Интерпериодика, Springer, Elsiever) и международными библиометрическими базами данных (Scopus, Web of Science, ScienceDirect, RSCI) по предоставлению сотрудникам полнотекстового онлайн-доступа к профильным научным статьям и публикациям, их участия в обучающих вебинарах по наиболее актуальным проблемам работы с МББД.

ПРОФИЛЬНЫЕ КАФЕДРЫ

ИБРАЭ РАН осуществляет образовательную деятельность с целью обеспечения преемственности поколений и подготовки научных кадров в рамках сотрудничества с рядом российских вузов по тематике безопасности атомной энергетики. В Институте работают две профильные кафедры, в процессе обучения на которых студенты активно участвуют в научных исследованиях и практических работах, проводимых Институтом.

КАФЕДРА ПРОБЛЕМ БЕЗОПАСНОГО РАЗВИТИЯ СОВРЕМЕННЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ МФТИ

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.

В 2019 году на базовой кафедре ИБРАЭ РАН обучалось 29 студентов: 20 бакалавриат, 9 магистратура. В учебном процессе задействованы ведущие специалисты, в числе которых: академики РАН Большов Л. А. и 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. На регулярной основе проводятся семинары по специальности, которые проводят как специалисты ИБРАЭ, так и сотрудники и преподаватели других организаций и вузов.

Занятия проходят в учебно-методическом центре, оборудованном современными компьютерами и средствами оргтехники.

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, который защищают по окончании 8-го семестра, получая степень бакалавра.

НА КАФЕДРЕ ПРЕПОДАЮТ:

2	10	9
АКАДЕМИКА РАН	ДОКТОРОВ НАУК	КАНДИДАТОВ НАУК

При наличии способностей, желания и рекомендации научного руководителя студенты поступают в двухгодичную магистратуру и занимаются научной работой в ИБРАЭ РАН. Кроме того, пятикурсники продолжают посещать семинары по специальности и слушают одиннадцать лекционных курсов. 6-й курс посвящен научной работе на кафедре и учебных занятий не предусматривает. Зимой студенты сдают госэкзамен по специальности. Результаты научной работы становятся содержанием магистерской диссертации, которая защищается по окончании 12-го семестра.

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;
- 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 учебой работать 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.

КАФЕДРА «ТЕХНОЛОГИИ ЗАМКНУТОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА» НИЯУ МИФИ

С сентября 2019 года в НИЯУ МИФИ началась подготовка студентов по профилю «Современные вычислительные методы и программные комплексы для анализа безопасности перспективных проектов АЭС». Часть курсов по профилю читается на базе ИБРАЭ РАН. Руководитель программы — научный руководитель ИБРАЭ РАН академик РАН Л. А. Большов.

Основная цель создания нового профиля — подготовка специалистов для центров ответственности проектного направления «Прорыв» с навыками работы с отечественными кодами нового поколения, применяемыми при разработке и обосновании безопасности объектов использования атомной энергии новой технологической платформы атомной энергетики.

Основную часть времени обучение проходит в НИЯУ МИФИ, а один полный учебный день студенты проводят в ИБРАЭ РАН, где им читаются курсы, отличительной особенностью которых является сочетание классических теоретических лекций и практических занятий с использованием конкретных программных комплексов (кодов нового поколения). В ходе занятий студентов знакомят с основными принципами разработки программного обеспечения для анализа безопасности АЭС: с математическими моделями, вычислительными методами, особенностями работы ядерных энергетических установок, а также со многими другими важными аспектами математического моделирования объектов использования атомной энергии.

Примерами курсов на базе ИБРАЭ РАН являются:

- **Моделирование процессов, протекающих в твэлах.** Рассматриваются основные процессы в топливе и оболочке твэла, определяющие и влияющие на его работоспособность и герметичность при облучении в активной зоне реакторных установок на быстрых нейтронах; проводятся практические занятия с кодом нового поколения БЕРКУТ.
- **Вычислительные технологии прикладного математического моделирования.** Обсуждаются современные вычислительные технологии, ориентированные на приближенное решение прикладных проблем, математические модели которых базируются на системах уравнений с частными производными; проводятся практические занятия с вычислительной платформой FEniCS.
- **Исследования теплогидравлики реакторных установок с водяным и жидометаллическим теплоносителем.** Обсуждаются общие вопросы моделирования процессов тепломассообмена в контурах реакторных установок с водяным и жидкометаллическим теплоносителем; проводятся практические занятия с кодом нового поколения HYDRA-IBRAE/LM.
- **Нуклидная кинетика и радиационная безопасность.** Рассматриваются вопросы обоснования радиационной безопасности алгоритмы моделирования нуклидной кинетики с оценкой изменения нуклидного состава среды, остаточного тепловыделения, активности и погрешности рассчитываемых параметров как в реакторе на быстрых нейтронах, так и в объектах ядерного топливного цикла; проводятся практические занятия с кодом нового поколения BPSD.
- **Интегральные расчеты реакторных установок с жидкометаллическим теплоносителем.** Рассматриваются особенности конструкции РУ с жидкометаллическим теплоносителем (основное оборудование, варианты компоновки, используемые и перспективные типы топлива и теплоносителя), разбираются вопросы связанного моделирования различных физических процессов; проводятся практические занятия с кодом нового поколения ЕВКЛИД.

Уже с первого семестра студенты привлекаются к решению реальных практически значимых задач, также проводится работа по адаптации студентов — опытные сотрудники института помогают студентам магистратуры с решением не только профессиональных задач, но и других вопросов, которые неизбежно возникают в современном быстроизменяющемся мире.

Студенты, показавшие хорошую успеваемость, а также проявившие трудолюбие и ответственность, получают возможность трудоустройства в ИБРАЭ РАН с целью реализации своих профессиональных навыков в реальных, востребованных отраслью, проектах.

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.

В 2019 ГОДУ В АСПИРАНТУРЕ ИБРАЭ РАН ОБУЧАЛОСЬ 20 ЧЕЛОВЕК, В ЧИСЛЕ КОТОРЫХ ВЫПУСКНИКИ БАЗОВОЙ КАФЕДРЫ МФТИ, А ТАКЖЕ ВЫПУСКНИКИ ДРУГИХ ВЕДУЩИХ ВУЗОВ РОССИИ

ДИССЕРТАЦИОННЫЙ СОВЕТ

С 1995 ГОДА 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 работает диссертационный совет Д 002.070.01 (действующий на основании приказа Минобрнауки России от 15 февраля 2013 г. № 75/нк) по защите диссертаций на соискание кандидатских и докторских степеней по двум 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).

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 2018—2020 гг. в Институте были успешно защищены 2 кандидатские и 2 докторские диссертации по теоретическим и практическим аспектам обеспечения безопасности атомной энергетики. Все соискатели являются сотрудниками ИБРАЭ РАН.

ИЗДАТЕЛЬСКАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ

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.

К настоящему времени Институтом опубликовано более **70 крупных научных трудов**, авторами и соавторами которых выступают сотрудники ИБРАЭ РАН, в том числе монографии и сборники научных трудов по основным направлениям деятельности Института, а также подготовленные при участии ИБРАЭ РАН **Российские национальные доклады** «Итоги и перспективы преодоления последствий чернобыльской аварии».

В период 2018—2020 гг. Институтом опубликованы **3 монографии**, **2 сборника работ** ежегодных научно-практических конференций «Школа молодых ученых ИБРАЭ РАН», а также подготовлены и изданы более **10 учебных пособий по компьютерным кодам нового поколения** в рамках реализации проектного направления «Прорыв».

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. В 2018—2020 гг. опубликовано около **20 препринтов**.

Все подготовленные Институтом печатные издания **доступны для скачивания** в электронном виде в разделе «Публикации» интернет-сайта ИБРАЭ РАН (**http://ibrae.ac.ru**).

Рисунок 5.1 — Учебные пособия III Школы-семинара пользователей кодов нового поколения

ЖУРНАЛ «РАДИОАКТИВНЫЕ ОТХОДЫ»

Научно-технический журнал «Радиоактивные отходы» начал издаваться Институтом в 2017 году. В 2019 году вышло четыре номера журнала (5—9), что позволило приступить к подготовке и направлению в Министерство образования и науки документов о включении журнала в перечень рецензируемых журналов ВАК.

В настоящее время журнал включен в библиографическую базу данных РИНЦ. За двухлетний период импакт-фактор РИНЦ журнала составляет **2,273**. С 2019 года опубликованным в журнале «Радиоактивные отходы» статьям присваивается цифровой идентификатор DOI.

За относительно небольшой период журнал решил задачу консолидации публикаций по тематике РАО. Так, в 2019 году в **33** российских периодических изданиях было опубликовано **93** статьи, касающихся различных аспектов обращения с РАО, в том числе в журнале «Радиоактивные отходы» опубликована **41** статья (более **44%**). Строго говоря, этот процент еще выше, поскольку многие из **52** статей, опубликованных в иных изданиях, в журнале «Радиоактивные отходы» не были бы приняты к публикации в связи с серьезными недостатками излагаемого в них материала. При этом в следующем по количеству опубликованных статей научном журнале представлено всего **4** статьи по данной тематике.

44% **ОТ ВСЕХ СТАТЕЙ В РОССИЙСКИХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ИЗДАНИЯХ, КАСАЮЩИХСЯ РАЗЛИЧНЫХ АСПЕКТОВ ОБРАЩЕНИЯ С РАО, ОПУБЛИКОВАНЫ В НАШЕМ ЖУРНАЛЕ**

В подготовке статей и представлении результатов своих работ на страницах журнала «Радиоактивные отходы» в 2019 году приняли участие **162** ученых и специалистов (в 2018 г. — **176**), среди которых **44** доктора и **60** кандидатов наук, что составляет **64%** от общего количества авторов журнала (в 2018 году — **32** доктора наук и **69** кандидатов наук, что составило **57%** от общего количества авторов).

Кроме печатного издания, выходит и электронная версия журнала «Радиоактивные отходы» на русском и английском языках, размещаемая на интернет-сайте **radwaste-journal.ru**. Следует отметить, что в течение 2019 года посещаемость сайта продолжала существенно возрастать. Можно с достаточным основанием утверждать, что в настоящее время количество посетителей сайта журнала «Радиоактивные отходы» приблизилось к количеству специалистов в нашей

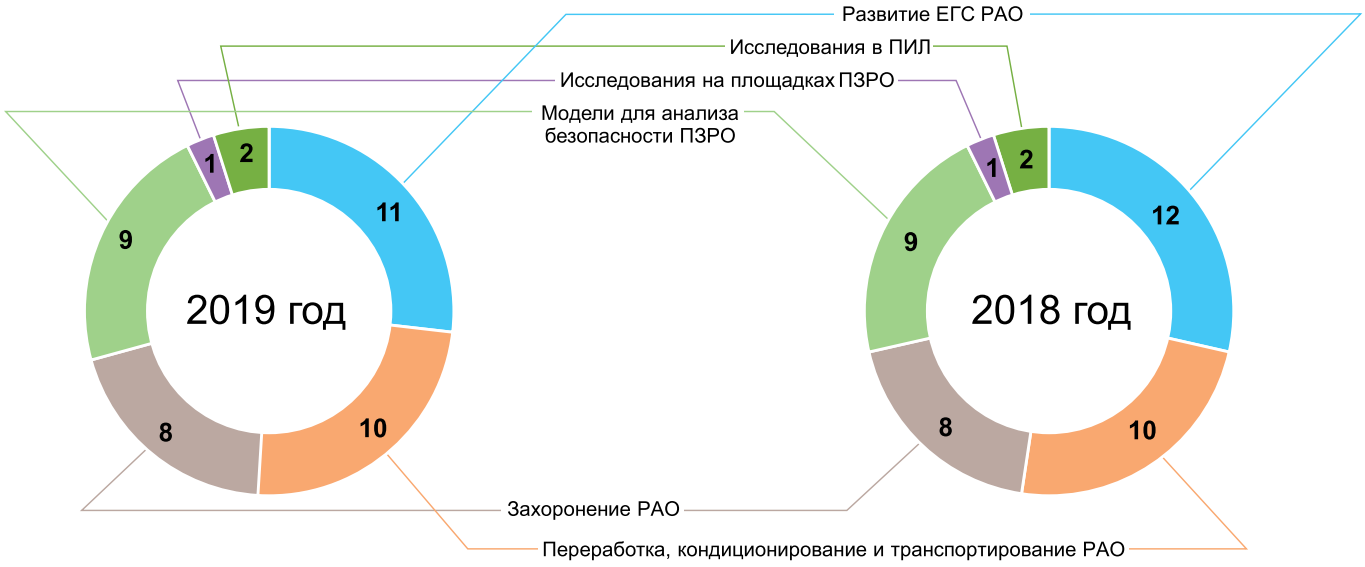


Рисунок 5.2 — Количество статей, опубликованных в основных рубриках журнала в 2019 и 2018 гг.

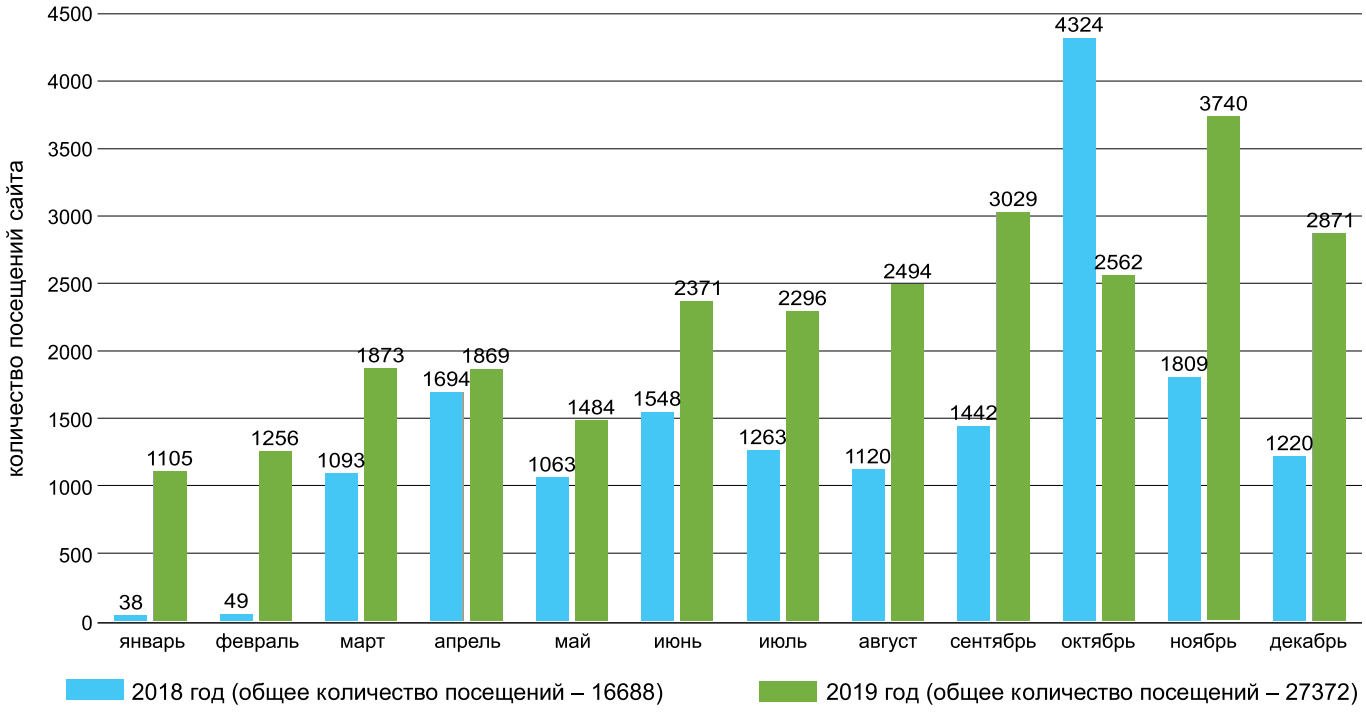


Рисунок 5.3 — Количество посещений сайта журнала «РАО» за 2018 и 2019 гг.

ЖУРНАЛ «АРКТИКА: ЭКОЛОГИЯ И ЭКОНОМИКА»

стране, занимающихся данной тематикой, и составляет приблизительно **3000** человек.

Научный и информационно-аналитический журнал «Арктика: экология и экономика», учредителем которого является ИБРАЭ РАН, издается с 2011 года. Журнал ориентирован на комплексное освещение актуальных проблем изучения и экономического освоения Арктики.

Журнал «Арктика: экология и экономика» включен в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК (с декабря 2015 года), индексируется в РИНЦ, входит в ядро РИНЦ, включен в базу данных **Russian Science Citation Index (RSCI)** на платформе **Web of Science** (с 2018 года), базу данных открытого доступа **DOAJ** (с 2019 года) и международную библиометрическую и реферативную базу данных **EBSCO** (с декабря 2019 года, раздел **Arctic&AntarcticRegions**).

По состоянию на июнь 2020 года вышло в свет **38** выпусков журнала, в которых опубликовано **490** статей. В 2019 году в 4 выпусках журнала опубликованы **43** статьи. В их подготовке приняли участие **119** ученых и специалистов, среди которых **3** академика и члена-корреспондента РАН, **44** доктора наук, **37** кандидатов наук (**72%** от общего числа авторов); в 2018 году из **138** авторов статей — **5** академиков и членов-корреспондентов РАН, **36** докторов наук и **58** кандидатов наук (**71%** от общего числа авторов).

2 **МЕСТО В РЕЙТИНГЕ SCIENCE INDEX ПО ТЕМАТИКЕ «КОМПЛЕКСНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ОТДЕЛЬНЫХ СТРАН И РЕГИОНОВ» ПО ИТОГАМ 2018 ГОДА**

По данным РИНЦ за 2018 год, журнал занимает **328**-е место среди всех российских научных журналов в рейтинге **SCIENCE INDE**X с показателем **1,859** (по тематике «Комплексное изучение отдельных стран и регионов» — 2-е место); пятилетний импакт-фактор составляет **1,417**, а двухлетний импакт-фактор — **2,393**. Значительное улучшение библиометрических показателей журнала и устойчивая положительная динамика в части цитирования опубликованных в нем научных статей свидетельствуют

о большом интересе к нему широкой научной общественности. По состоянию на апрель 2020 года общее число цитирований журнала в РИНЦ — **3348; h-index** журнала по базе **RSCI** равен **6** при среднем числе цитирований статьи **0,85** источниками.

Журнал включен в международную систему библиографических ссылок **CrossRef**; опубликованным статьям присваивается цифровой идентификатор объекта DOI.

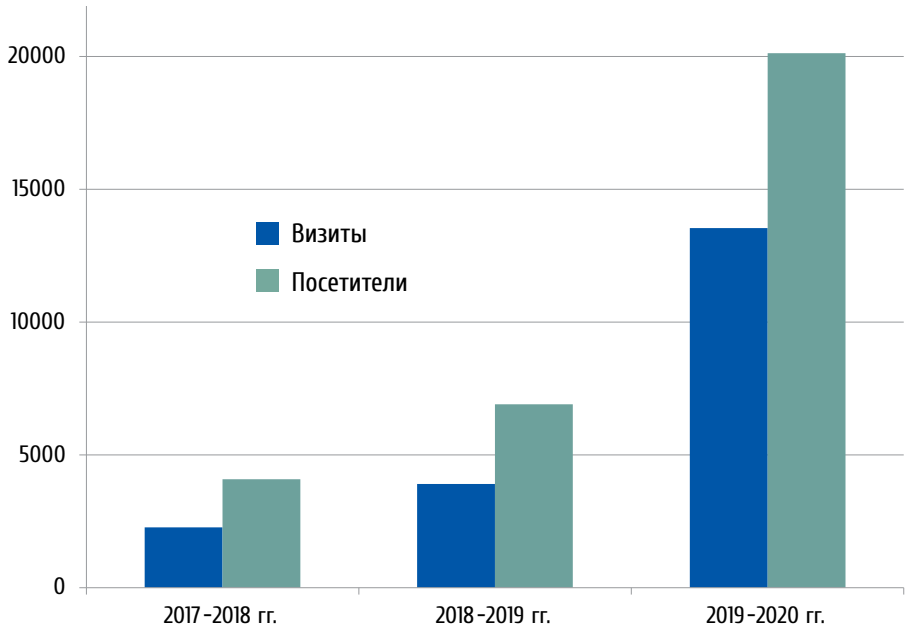
В первом квартале 2019 года была осуществлена масштабная модернизация интернет-сайта журнала (**http://arctica-ac.ru**) с учетом требований международных наукометрических баз данных (**Scopus, WoS**). Новый функционал сайта реализует широкий набор пользовательских сервисов и обеспечивает возможность интеграции в поисковые системы как в русскоязычном, так и в англоязычном сегментах Интернета.

Следует отметить, что в 2019 году и в первом квартале 2020 года посещаемость сайта возросла почти в 3 раза по сравнению с аналогичными периодами 2017—2019 гг. и достигла величины в **20 000** посещений; число новых посетителей превысило **13 500**. Объем просмотров активных страниц сайта за период с апреля 2017 года по апрель 2020 года — более **90 000** при достаточно высокой средней глубине просмотра (**2,93** страницы за визит). Рост посещаемости сайта свидетельствует о высоком качестве научного материала журнала и востребованности его контента в сочетании с большими функциональными и пользовательскими возможностями сайта. Можно с уверенностью говорить о формировании устойчивой целевой аудитории журнала, в которую входит большое количество ученых и специалистов, тесно связанных с его тематикой.

В августе 2019 была отправлена заявка на включение журнала в международную наукометрическую базу Scopus. В настоящее время заявка находится в стадии рассмотрения в Консультативном совете по отбору контента Scopus (CSAB).

Включение журнала «Арктика: экология и экономика» в ведущие международные наукометрические и библиографические базы данных, наряду с участием в работе Редакционного совета ряда авторитетных зарубежных ученых, позволит расширить сферу охвата целевой, в том числе иностранной, аудитории и повысить

Рисунок 5.4 – Распределение статей по основным рубрикам журнала в 2018 и 2019 гг.



13500

ОБЩЕЕ ЧИСЛО ЧИСЛО НОВЫХ ПОСЕТИТЕЛЕЙ САЙТА ЖУРНАЛА В 2019—2020 ГГ.

Рисунок 5.5 — Посещаемость сайта журнала «Арктика: экология и экономика» в период с 2017 по 2020 гг.

уровень цитируемости статей журнала в англоязычной научной литературе.

УЧАСТИЕ УЧЕНЫХ ИНСТИТУТА В РАБОТЕ НАУЧНЫХ СОВЕТОВ ПО ПРОБЛЕМАМ БЕЗОПАСНОСТИ

В ОБЛАСТИ ЭНЕРГЕТИКИ И РЕДАКЦИОННЫХ КОЛЛЕГИЙ НАУЧНЫХ ЖУРНАЛОВ

Ученые и специалисты Института входят в состав ряда академических и отраслевых научных Советов, секций и комиссий по различным аспектам обеспечения безопасности в области энергетики, а также принимают активное участие в работе редакционных коллегий ряда ведущих периодических изданий в соответствии с профилем их научных интересов.

Среди них такие научные и научно-технические издания, как:

- «АНРИ»;
- «Атомная энергия»;
- «Вопросы радиационной безопасности»;
- «Известия РАН. Энергетика»;
- «Радиация и риск»;
- «Энергия: энергетика, техника, экономика».

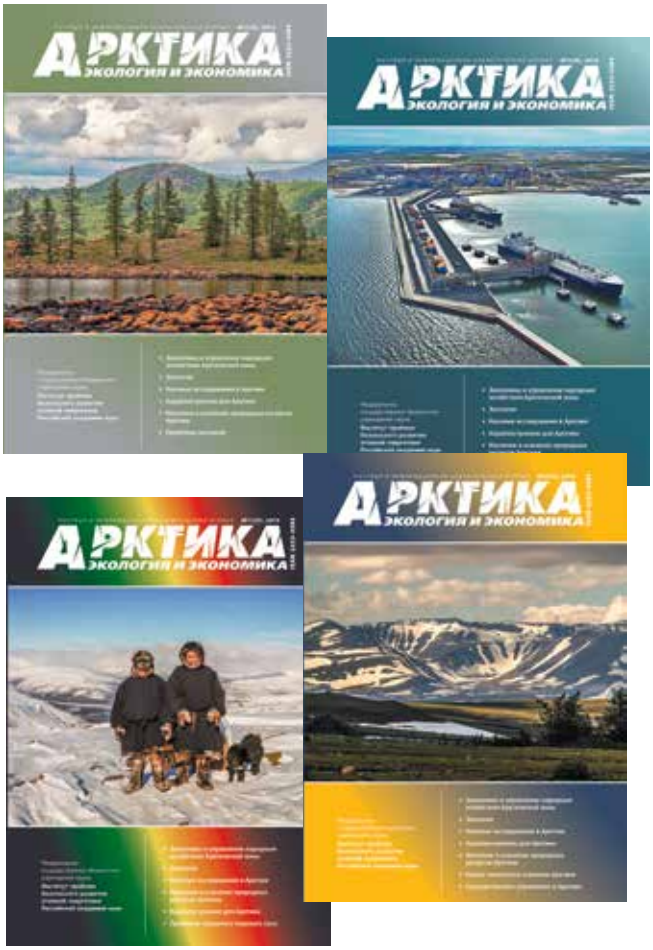


Рисунок 5.6 — Журналы «Арктика: экология и экономика» за 2019 год

6 Общественные организации

СОВЕТ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ

В Институте традиционно большое внимание уделяется поддержке молодых ученых. Совет молодых ученых и специалистов (СМУиС) был создан более 20 лет тому назад при активной поддержке директора Института Л. А. Большова. Совета осуществляет деятельность по четырем направлениям.

- **Вовлечение студентов профильных кафедр.** Совет организует семинары «Введение в специальность», где преподают ведущие ученые и специалисты Института. В 2019 году состоялось более 30 таких лекций.
- **Стимулирование научной деятельности молодых ученых**. СМУиС при поддержке администрации ежегодного организует проведение конкурса на лучшую научную работу и научной конференции Школа молодых ученых ИБРАЭ РАН. В 2019 году в конкурсе участвовало 20 работ. Победители (одно первое место, два вторых и четыре третьих) были награждены денежными премиями и почетными грамотами. В сентябре 2019 года состоялась юбилейная XX Школа молодых ученых ИБРАЭ РАН. Было представлено более 40 докладов молодых ученых и специалистов по пяти секциям. Помимо молодых ученых Института в конференции участвовали молодые ученые НИЯУ МИФИ, НИУ МЭИ, АО «ГНЦ РФ-ФЭИ», ФГУП ПО «МАЯК», ФБУ «НТЦ ЯРБ», НИЦ «Курчатовский институт», АО «НИКИЭТ». По итогам юбилейной Школы опубликован сборник трудов конференции «XX Школа молодых ученых ИБРАЭ РАН».
- **Ознакомление молодых специалистов с предприятиями атомной отрасли**, включая организацию технических туров, демонстрацию тематических научно-популярных и художественных фильмов. В мае 2019 года при поддержке дирекции был организован технический тур на Нововоронежскую АЭС. Участ-

Рисунок 6.1 — Юбилейная XX Школа молодых ученых ИБРАЭ РАН

Рисунок 6.2 – Технический тур на Нововоронежскую АЭС

никами технического тура стали 27 человек (рис. 6.2). В июне 2019 года СМУиС организовал показ фильма «Чернобыль» (производства HBO (США) и Sky UK (США)) с комментариями ведущих сотрудников Института — непосредственных участников описываемых в фильме событий.

- **Культурно-массовая и спортивная работа.** День здоровья в Битцевском парке является традиционным спортивным мероприятием, который СМУиС проводит уже более 8 лет (рис. 6.3). Победителям спортивно-развлекательных конкурсов и всем участникам спортивного мероприятия были вручены призы от дирекции Института.

В июне 2019 года при поддержке Профкома ИБРАЭ РАН был проведен традиционный шахматный турнир. Четверо победителей турнира (рис 6.4) были награжденными ценными призами.

Рисунок 6.3 – День здоровья в Битцевском парке

ПЕРВИЧНАЯ ПРОФСОЮЗНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ИБРАЭ РАН

Первичное отделение профессионального союза работников Российской академии наук в было образовано в ИБРАЭ РАН вскоре после создания Института, в 1992 году. Если поначалу отношение сотрудников к Профсоюзу было безразличным или даже скептическим, то по мере становления ИБРАЭ, роста его научного веса и влияния в атомной отрасли, повышался и авторитет профсоюзной организации, которая стала играть значимую роль в общественной жизни Института.

В этих условиях администрация и профком Института приняли решение совместно определить задачи и направления деятельности общественного объединения. Стороны приняли Соглашение о социальном партнерстве, согласно которому был сформирован бюджет и определен механизм реализации мер по решению социальных вопросов работников. Впоследствии на основе Соглашения был подписан **Коллективный договор**, регламентирующий основные аспекты взаимоотношений администрации и сотрудников Института. Как результат — заметно возросло число членов первичной профсоюзной организации ИБРАЭ РАН, были поставлены новые задачи, связанные с укреплением здоровья работников, оказания адресной помощи не только действующим, но и ушедшим на заслуженный отдых сотрудникам и членам их семей, решением целого ряда бытовых проблем и вопросов культурного досуга.

В 2019 году численность членов Профсоюза в Институте составила **319** человек, оставаясь на этом уровне в течение 4 последних лет. В этом плане первичная организация профсоюза ИБРАЭ РАН является наиболее стабильным звеном Московской организации. В тот же период объем расходов на оказание социальных услуг сотрудникам Института увеличивался в среднем на **30%** в год, и в 2019 году в абсолютном выражении оказался максимальным за все время, начиная с 2000 года, а общий социальный бюджет в текущем году составил **4889** тыс. руб. Из этой суммы **60%** составили различные виды материальной помощи и **30%** — премии сотрудникам.

В тесном содружестве с администрацией, Советом молодых ученых и специалистов, Советом ветеранов вооруженных сил, профком ИБРАЭ РАН прилагает усилия, чтобы коллектив Института был как можно более сплоченным, дружным, деятельным, обладал крепким здоровьем и высоким творческим потенциалом. На эти цели направлен ряд социальных программ, реализуемых в Институте: **«Здоровое зрение», «Молодая семья», «Мы дружим со спортом»**.

Рисунок 6.4 – Шахматный турнир сотрудников Института

Список сокращений

CFD-код — компьютерная программа, реализующая вычислительную гидродинамическую модель турбулентности

DNS — гидродинамическая модель турбулентности; прямое численное моделирование (Direct Numerical Simulation)

IAEA — International Atomic Energy Agency (Международное агентство по атомной энергии)

IRSN — Институт радиационной защиты и ядерной безопасности Франции (ИРСН)

LES — гидродинамическая модель турбулентности; модель крупных вихрей (Large Eddy Simulation)

NEA — Агентство по ядерной энергии (Nuclear Energy Agency)

OECD — Организация экономического сотрудничества и развития (Organisation for Economic Cooperation and Development)

PLM — управление жизненным циклом (Product Lifecycle Management)

RANS — гидродинамическая модель турбулентности; модель напряжений Рейнольдса

SDA — программно-определенная сервис-ориентированная архитектура

WRF — региональная модель численного прогноза погоды

а.з. — активная зона реактора

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 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 тяжелая — запроектная авария с повреждением твэлов выше максимального проектного предела (НП-001-15)

АПЛ — атомная подводная лодка

АР — аварийное реагирование

АСКРО — автоматизированная система контроля радиационной обстановки

АСММ — атомные станции малой мощности

АСУ ТП — автоматизированная система управления технологическими процессами

АФС — алюмофосфатное стекло

АЭС — атомная электростанция

БН — реактор на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем

ВАБ — вероятностный анализ безопасности

ВВЭР — атомный реактор водо-водяного типа

ГХК — Горно-химический комбинат

ЖМТ — жидкометаллический теплоноситель

ЖРО — жидкие радиоактивные отходы

ЗО — защитная оболочка АЭС

ЗСЖЦ — заключительная стадия жизненного цикла

ЗЯТЦ — замкнутый ядерный топливный цикл

ИР — источник радиоактивности

ИС — информационная система

КВУ — кластерная вычислительная установка

КИРО — комплексное инженерное и радиационное обследование

КЦ — кризисный центр

ЛВС — локальная вычислительная сеть

МАГАТЭ — Международное агентство по атомной энергии (IAEA)

МОКС — перспективное ядерное топливо, смесь оксидов U и Pt, которое предполагается использовать в легководных энергетических реакторах (PWR и BWR)

мультифизичный — подход, основанный на решении системы сопряженных (взаимосвязанных) задач

НВАЭС — Нововоронежская атомная электростанция

НДС — напряженно-деформированное состояние защитной оболочки

НИР — научно-исследовательские работы

НИОКР — научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы

НКМ — Нижнеканский массив горных пород

НЦУКС — Национальный центр управления кризисными ситуациями МЧС России

ОДЭК — опытно-демонстрационный энергокомплекс

ОИАЭ — объект использования атомной энергии

ОНРАО — очень низкоактивные радиоактивные отходы

ОТВС — отработавшие тепловыделяющие сборки

ОЭСР — Организация экономического сотрудничества и развития

ОЯТ — отработавшее ядерное топливо

ПГ — парогенератор

ПГЗРО — пункт глубинного захоронения радиоактивных отходов

ПД — продукты деления;

ПЗРО — пункт захоронения радиоактивных отходов

ПИЛ — подземная исследовательская лаборатория

ПН — проектное направление

ПО — программное обеспечение

ПС — программное средство

ПТК — программно-технический комплекс

ПТК ВЦАЭС — программно-технический комплекс «Виртуально-цифровая АЭС с ВВЭР»

ПУГР — промышленный уран-графитовый реактор

РАО — радиоактивные отходы

РБН — реактор на «быстрых нейтронах»; ядерный реактор, в активной зоне которого нет замедлителей нейтронов

РБМК — реактор большой мощности канальный («чернобыльского типа»)

РИД — результат интеллектуальной деятельности

РИНЦ — российский индекс научного цитирования (библиометрическая база данных)

РК — расчетный код

РКО — расчетный комплекс оптимизации

РМ — радиационный мониторинг

РПК — расчетно-прогностический комплекс

РУ — реакторная установка

РУТА — руководство по управлению тяжелыми авариями

САПР — система автоматизированного проектирования (CAD)

СМП — Стратегический Мастер-план

СМП НКМ — Стратегический Мастер-план исследований в обоснование безопасности сооружения, эксплуатации и закрытия пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов в Нижнеканском массиве горных пород

СНУП — смешанное нитридное уран-плутониевое топливо

СУБД — система управления базами данных

стратификация — расслоение в потоке жидкости или газа

СЦР — самоподдерживающаяся цепная реакция деления

ТАСКРО — территориальная АСКРО

ТВС — тепловыделяющая сборка

твэл — тепловыделяющий элемент; основной конструктивный элемент активной зоны ядерного реактора, содержащий ядерное топливо

ТЖМТ — тяжелый жидкометаллический теплоноситель

ТЗ — техническое задание

ТКВ — Теченский каскад водоемов

ТКЦ — Технический кризисный центр ИБРАЭ РАН (в 2013 г. преобразован в ЦНТП)

ФГУП — федеральное государственное унитарное предприятие

ФЦП — Федеральная целевая программа

ЦНТП — Центр научно-технической поддержки ИБРАЭ РАН (преобразован из ТКЦ в 2013 г.)

ЧС — чрезвычайная ситуация

ЯРБ — ядерная и радиационная безопасность

ЯРОО — ядерно и радиационно опасный объект

ЯТЦ — ядерный топливный цикл

ЯЭ — ядерная энергетика