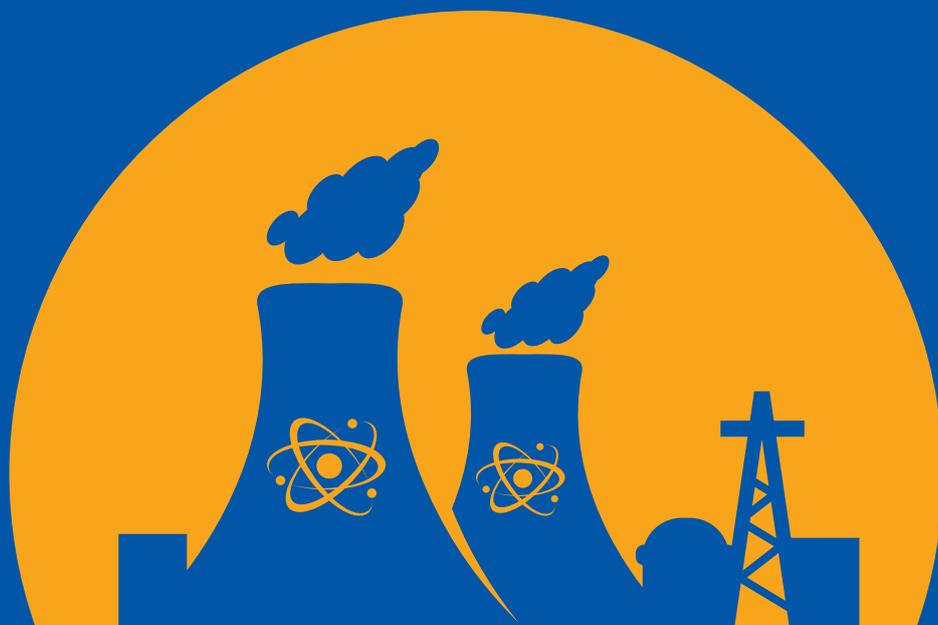




ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ БЕЗОПАСНОГО РАЗВИТИЯ
АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК



ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТ

за **2021** год



ИБРАЭ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ

**ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ БЕЗОПАСНОГО РАЗВИТИЯ
АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТ

за **2021** год

УДК 621.039

ББК 31.4

075

Основные результаты работ за 2021 г. / Под общ. ред. акад. РАН Л. А. Большова; Ин-т проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук (ИБРАЭ РАН). — М., 2022. — 114 с. : ил. — ISBN 978-5-907375-07-9.

Настоящий годовой отчет представляет собой обзор основных направлений научно-исследовательской и научно-организационной деятельности ИБРАЭ РАН за 2021 год.

В отчет вошли наиболее значимые результаты работ Института в области: создания и практического использования физико-математических моделей, современных численных методов и вычислительных алгоритмов нового поколения для обоснования безопасности атомных реакторных установок и прогнозирования распространения радионуклидов в окружающей среде; комплексного анализа безопасности ядерных энергетических установок, разработки и внедрения соответствующего программного обеспечения; расчетно-экспериментальных исследований теплофизических процессов в ядерных установках; разработки современных информационных технологий управления жизненным циклом объектов атомной энергетики; обоснования безопасности объектов обращения с ОЯТ, РАО и вывода из эксплуатации ядерных установок; информационной поддержки разработки и реализации программ в сфере ЯРБ; исследования проблем радиационной безопасности объектов атомного флота, АСММ и радиационно опасных объектов исследовательского назначения; совершенствования систем аварийной готовности и реагирования; 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 2021 году.

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

ISBN 978-5-907375-07-9



Большов Леонид Александрович

академик РАН,
научный руководитель ИБРАЭ РАН

Дорогие читатели!

В настоящем отчете мы оглядываемся на прошедший 2021 год. Год очень непростой — второй пандемийный. Многие из сотрудников ИБРАЭ находились на дистанционном или частично дистанционном режиме работы. Институт был к этому готов не только технически, но и организационно. Все наши сотрудники работали без остановок или замедления и без ссылок на ограничения.

Самое главное, что у нас не угас энтузиазм. Мы научились работать на удаленке, хотя и привыкли к ежедневному общению и обсуждению хода работы, планов и результатов. В значительной мере нам удалось заменить эти обсуждения и встречи с нашими сотрудниками и сотрудниками других организаций частыми видеоконференциями. Нам удалось создать условия для конструктивного диалога, обмена опытом и мнениями. Мы постоянно работаем над расширением вычислительных возможностей Института. В этот сложный 2021 год начались работы по созданию нового вычислительного кластера, и сегодня суммарный объем вычислительных мощностей в Институте составляет уже порядка 280 Тфлопс, и мы планируем дальнейшее его увеличение.

Очень важно, что в непростых условиях кризиса и пандемии у всех сотрудников Института не пропал интерес к работе, мы сохранились как мощный коллектив, настроенный на успех и дальнейшее развитие. Работали наши образовательные структуры в МФТИ и МИФИ, проводились защиты диссертаций на Диссертационном совете в новом гибридном (очном/заочном) формате с использованием удаленного режима работы в режиме видеоконференции.

Сотрудники Института продолжали активно развивать международное сотрудничество, участвуя в десятках семинаров и совещаний. Мы провели 11-ю Российскую научную конференцию «Радиационная защита и радиационная безопасность в ядерных технологиях», в которой приняли участие более 300 ведущих специалистов страны.

Результаты работ сотрудников ИБРАЭ были отмечены на заседаниях Президиума РАН, руководством ГК «Росатом» и научной общественностью. Благодаря нашим ученым и работникам Института проводятся анализы и обоснования безопасности атомных станций, обосновываются и оптимизируются мероприятия в области завершающих стадий жизненного цикла, развивается и совершенствуется система радиационного мониторинга и аварийного реагирования страны, делается многое, многое другое. Основные результаты, полученные Институтом в 2021 году, представлены в настоящем Отчете.

Я хочу поблагодарить своих коллег за проделанную работу и подчеркнуть, что огромный вклад в нее каждого из сотрудников Института был особенно осязаем в этот сложный период.

С уважением,

Л. Большов



Матвеев Леонид Владимирович

д.ф.-м.н.

директор ИБРАЭ РАН

Уважаемый читатель!

В предлагаемом Вашему вниманию отчете представлены основные результаты работы ИБРАЭ РАН за 2021 год.

В 2021 году успешно прошли аттестацию усовершенствованный код БЕРКУТ/У и таблицы справочных данных по теплофизическим свойствам свинцового теплоносителя. Готовятся к подаче на аттестацию интегральный код COMPLEX/V3.0, предназначенный для обоснования радиационной безопасности объектов топливного цикла, HEFEST_CC и MCCI_4_MCCI, предназначенные для анализа поведения расплава на вне реакторной стадии аварии. На основе кода TITAN для ВВЭР разрабатывается интегральный код для расчета аварийных процессов на энергоблоках с РУ РБМК-1000.

Осуществляются дальнейшее развитие и верификация кодов семейства СОКРАТ, их использование для анализа безопасности как отечественных РУ (РИТМ 200, энергоблоки Ростовской и Калининской АЭС), так и зарубежных АЭС («Ханхикиви», «Аккую»), а также их адаптация для исследования преимуществ использования аварийно-устойчивого топлива с перспективными оболочками для повышения водородной взрывобезопасности.

В 2021 году Институт вплотную приступил к созданию программно-методической базы для обоснования безопасности объектов термоядерной энергетики. Начаты работы по развитию законодательной и нормативной базы в области безопасного использования новых типов ядерных установок, термоядерных и гибридных систем.

В рамках внедрения цифровых технологий в практику планирования работ по выводу из эксплуатации ЯРОО были созданы цифровые информационные модели (ЦИМ) для площадок радиохимического производства ФГУП «РАДОН» (г. Москва), радиохимического завода ФГУП ГХК (г. Железногорск, Красноярский край), АО «Радиевый институт им. В.Г. Хлопина» (г. Санкт-Петербург). Разработан комплекс расчетных моделей для обоснования безопасности конечного состояния рассматриваемых площадок и работ по выводу их из эксплуатации.

Важным элементом работы в сфере ЯРБ является обеспечение публичности проводимых мероприятий. С этой целью в 2021 году:

- ИБРАЭ РАН были проведены три технических тура на площадки реализации ФЦП ЯРБ-2 с участием более 70 представителей общественности, экспертного сообщества и СМИ;*
- опубликован первый публичный отчет об итогах реализации ФЦП ЯРБ-2 в 2016—2020 гг.;*
- 26 апреля 2021 года ИБРАЭ РАН представил Российский национальный доклад «35 лет чернобыльской аварии. Итоги и перспективы преодоления ее последствий в России».*

Была организована и проведена XI Российская научная конференция «Радиационная защита и радиационная безопасность в ядерных технологиях», программный комитет которой возглавил научный руководитель ИБРАЭ РАН академик Л. А. Большов.

Были продолжены активные работы по доизучению площадки и обоснованию безопасности подземной исследовательской лаборатории, в частности, по развитию информационно-аналитической платформы научного сопровождения PULSE.

В 2021 году состоялось официальное открытие филиала ИБРАЭ РАН в г. Железногорск, в задачи которого входят инфраструктурное и научное обеспечение реализации программы исследований подземной лаборатории, а также информационная и технологическая поддержка работ ИБРАЭ РАН по ВЭ ЯРОО ФГУП ГХК.

Для решения комплекса задач обоснования безопасности ЗСЖЦ разрабатывается набор российских расчетно-прогностических комплексов (FENIA, RELTRAN, GeRa, КОРИДА, MOUSE), которые позволят решать весь комплекс практических задач без применения иностранных аналогов.

Продолжено исследование радиологических проблем Арктической зоны Российской Федерации, связанных с последствиями возможных выбросов радионуклидов при гипотетических авариях на ядерных объектах. Совместно с ИВМ РАН развита усовершенствованная модель распространения радионуклидов ВИТИМ3.1, включающая специфические для данного региона механизмы переноса. В 2021 году подведены итоги совместных исследований ИБРАЭ РАН и ДВО РАН по реконструкции и оценке последствий ядерной аварии на АПЛ в бухте Чажма, самой крупной аварии на транспортных ЯЭУ.

В рамках развития систем аварийной готовности и реагирования в ИБРАЭ РАН получила принципиальное развитие система прогноза параметров радиационной обстановки для своевременной и адресной защиты населения в условиях тяжелых аварий, сопровождаемых значительными выбросами радиоактивности, большими длительностями и неопределенностями. Выполнено большое количество работ по оценке решений по демонтажу объектов, находящихся на заключительных стадиях жизненного цикла (объектов АО «АЭХК», ФГУП «ГХК», АО «РИ им. В.Г. Хлопина»). Полностью завершены работы по созданию быстроразворачиваемой автоматизированной системы контроля радиационной обстановки (получен номер в реестре средств измерения РФ). Начато создание (выполнен проект) аварийно-технического центра Объединенного института ядерных исследований (г. Дубна).

В области фундаментальных расчетно-теоретических исследований продолжены расширение функционала программы для ЭВМ CABARET-SC1, совершенствование расчетных схем нестационарных течений неоднородной среды со свободной поверхностью, разработка новой версии программного комплекса CADAM для моделирования аварийного переноса радионуклидов в водных средах. Проанализированы возможности развитого ранее асимптотического метода для моделирования переноса радионуклидов в анизотропных и резко контрастных геологических средах.

Большое внимание уделялось развитию вычислительных и коммуникационных сетей Института. Так, производительность всех вычислительных ресурсов в 2021 году возросла более чем в пять раз и достигла 282 TFlops.

Институт активно ведет международную, научно-образовательную и издательскую деятельность. Начиная с первого квартала 2021 года статьи, размещенные в журнале «Арктика: экология и экономика», индексируются в международной наукометрической базе данных SCOPUS.

В целом можно с уверенностью утверждать, что Институт успешно развивается, чувствует себя уверенно и его деятельность крайне востребована. Далее в отчете представлены основные результаты работ за 2021 год, структурированные по направлениям.



Л. В. Матвеев

Содержание



1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ИБРАЭ РАН	8
Коллектив и структура Института в 2021 году	9
Направления научно-исследовательской деятельности Института	11
2. ОСНОВНЫЕ ИТОГИ РАБОТ В 2021 ГОДУ	13
2.1. БЕЗОПАСНОСТЬ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ	14
Разработка программного обеспечения для анализа безопасности атомных станций	14
Анализ безопасности ядерных энергетических установок	23
Расчетно-экспериментальные исследования теплофизических процессов в ядерных установках	27
Информационные технологии управления жизненным циклом объектов атомной энергетики.....	32
2.2. БЕЗОПАСНОСТЬ ЗАВЕРШАЮЩИХ СТАДИЙ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ОБЪЕКТОВ ЯДЕРНОЙ ТЕХНИКИ	37
Информационно-аналитическая поддержка комплексных проблем ядерной и радиационной безопасности	37
Научное обеспечение завершающей стадии жизненного цикла объектов ядерной техники	45
Исследование проблем радиационной безопасности объектов атомного флота, АСММ и радиационно опасных объектов исследовательского назначения.....	53
2.3. БЕЗОПАСНОСТЬ НАСЕЛЕНИЯ	67
Развитие систем радиационного мониторинга, аварийной готовности и реагирования.....	67



2.4. РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ	73
Численные методы и вычислительные алгоритмы.....	73
Теоретическая физика	80
3. РАЗВИТИЕ ИНФРАСТРУКТУРЫ	91
4. МЕЖДУНАРОДНОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО	93
5. НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ И ИЗДАТЕЛЬСКАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ.....	102
Профильные кафедры.....	102
Кафедра проблем безопасного развития современных энергетических технологий МФТИ	102
Кафедра «Технологии замкнутого ядерного топливного цикла» НИЯУ МИФИ	104
Аспирантура.....	105
Диссертационный совет.....	105
Издательская деятельность	106
Журнал «Радиоактивные отходы»	107
Журнал «Арктика: экология и экономика»	109
6. ОБЩЕСТВЕННЫЕ ОРГАНИЗАЦИИ.....	111
Совет молодых ученых и специалистов.....	111
Первичная профсоюзная организация ИБРАЭ РАН.....	112
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....	113

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. 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. 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 проектных и запроектных режимах работы;
- разработка, аттестация в Ростехнадзоре и внедрение в практику программного обеспечения для обоснования безопасности объектов использования атомной энергии;
- разработка виртуальных моделей АЭС;
- анализ тяжелых аварий на АЭС и обоснование технических решений по локализации расплава ядерного топлива;
- обоснование оптимальных режимов функционирования защитных оболочек 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» II, 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—2021 годах ИБРАЭ РАН неизменно входил в первую категорию научных организаций.



КОЛЛЕКТИВ И СТРУКТУРА ИНСТИТУТА В 2021 ГОДУ

По состоянию на 1 января 2022 года общая штатная численность ИБРАЭ РАН (с учетом филиалов) составляла **574** человек, в том числе **426** сотрудников научных подразделений. Среди них: **4** академика РАН, **1** член-корреспондент РАН, **44** доктора наук и **124** кандидата наук.

В Новосибирском филиале ИБРАЭ РАН работали **19** человек, в том числе **16** сотрудников научных подразделений, среди которых **1** член-корреспондент РАН, **2** доктора наук и **3** кандидата наук.

В сентябре 2021 года был открыт Красноярский филиал ИБРАЭ РАН (в г. Железногорск), в котором работали **5** сотрудников, в том числе **1** кандидат 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 дея-

тельности. 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;
- 3 самостоятельных отделов;
- лаборатории теоретической физики.





Заместитель
директора

О. В. Цацулина

(ovts@ibrae.ac.ru)

В структуре Новосибирского филиала ИБРАЭ РАН представлен Отдел теплофизики и физической гидродинамики, включающий 3 исследовательские лаборатории.

Красноярский филиал ИБРАЭ РАН структурно состоит из 2 отделов.

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 специализированных 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 Отчета.

БЛОК ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ ФИНАНСОВОГО, КАДРОВОГО И ТЕХНИЧЕСКОГО 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;

Контрактная служба, договорной и юридический отделы этого блока обеспечивают участие

в конкурентных процедурах с заключением договоров / контрактов, а также сопровождают и исполняют все действующие договора / контракты. ИБРАЭ РАН работает более чем с 40 заказчиками.

Также Институт в 2021 году осуществил более 150 конкурентных закупок на поставку товаров, выполнение работ и оказание услуг.

Программа обеспечения качества реализует 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;
- свободный онлайн-доступ сотрудников ИБРАЭ РАН к российским и международным информационным ресурсам, в том числе к 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 журналов «Арктика: экология и экономика» и «Радиоактивные отходы»;
- администрирование и обеспечение контентом интернет-сайтов ИБРАЭ и выпускаемых научных журналов.

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



НАПРАВЛЕНИЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ИНСТИТУТА

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

В 2021 году ИБРАЭ РАН осуществлял научно-исследовательскую и организационную деятельность в следующих основных направлениях:

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

- разработка физико-математических моделей, современных численных методов и вычислительных алгоритмов нового поколения для моделирования гидродинамики и тепло-массообмена применительно к проблемам обоснования безопасности атомных реакторных установок и прогнозирования распространения радионуклидов в окружающей среде;
- расчетно-теоретические исследования параметров активных зон ядерных реакторов различных типов и характеристик топливного цикла, исследования проблем обеспечения водородной взрывобезопасности объектов атомной энергетики;
- теоретические исследования процессов переноса примеси в сильно неоднородных средах применительно к проблеме захоронения радиоактивных отходов в геологических средах;
- разработка моделей сопряженных процессов теплообмена, гидродинамики и фазовых переходов применительно к проблеме изоляции радиоактивных отходов;
- разработка аналитических и численных моделей окисления новых перспективных ATF-оболочек ядерных реакторов;
- фундаментальные исследования в смежных областях физики.

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

- разработка, валидация и аттестация интегральных расчетных кодов для моделирования различных режимов работы АЭС с реакторными установками технологии ВВЭР и РБМК, а также кодов нового поколения для обоснования безопасности и достижения оптимальных технологических показателей проектов и технологий проектного направления «Прорыв»;
- выполнение расчетов АЭС с реакторными установками различных типов для обоснования их безопасности или выбора оптимальных проектных решений;
- разработка методик, математических моделей и расчетных кодов для моделирования напряженно-деформированного состояния защитных оболочек АЭС различного типа при воздействии эксплуатационных и аварийных нагрузок;
- разработка компонентов цифровых двойников АЭС, в частности интегральных расчетных математических моделей энергоблока с РУ БР-1200 и ОДЭК с РУ БРЕСТ-ОД-300;
- разработка и внедрение интегрированного программного комплекса СОКРАТ для детерминистического анализа тяжелых аварий на АЭС с реакторами ВВЭР, БН и РИТМ;
- анализ процессов и разработка инженерных моделей для анализа представительных аварий на термоядерных установках типа ИТЭР;
- численный анализ тяжелых аварий на АЭС с реакторами ВВЭР и БН;

- обоснование, планирование и сопровождение экспериментальных исследований по теплогидравлике теплоносителей в реакторных установках; расчетное моделирование реакторных установок, в том числе разработка кодов для обоснования безопасности АЭС с перспективными теплоносителями;
- исследование физических процессов перспективных нейтронных технологий;
- развитие информационных технологий управления жизненным циклом сложных технических объектов, в том числе объектов атомной энергетики.

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

- создание цифровых информационных моделей площадок и объектов для задач комплексного планирования вывода из эксплуатации ядерных объектов и обращения с РАО;
- развитие нормативной базы в области безопасности новых типов ядерных установок, термоядерных и гибридных систем;
- нормативно-методическая поддержка планирования и выполнения мероприятий в сфере ЗСЖЦ;
- комплексный мониторинг эффективности реализации ФЦП ЯРБ-2;
- обоснование безопасности захоронения РАО;
- разработка и применение расчетно-методического инструментария оценки безопасности объектов ядерного топливного цикла;
- инфраструктурное и научное обеспечение реализации программы исследований подземной лаборатории, создаваемой ФГУП «НО РАО», а также информационная и технологическая поддержка работ ИБРАЭ РАН по ВЭ ЯРОО ФГУП «ГХК»;
- исследования радиоэкологических проблем Арктической зоны Российской Федерации;
- долгосрочное планирование и реализация мероприятий по повышению радиационной безопасности организаций РАН.

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

- комплексный анализ радиационных последствий аварий с учетом неопределенностей;

- фундаментальные и прикладные исследования по моделированию распространения радионуклидов в атмосфере;
- обоснование радиационной безопасности населения при выводе из эксплуатации ОИАЭ;
- разработка аппаратных и программных средств и информационных систем для решения задач радиационного мониторинга и оценки возможных последствий аварийных ситуаций радиационного характера;
- обеспечение через Центр научно-технической поддержки ИБРАЭ РАН научно-технической и экспертной поддержки мероприятий по аварийному реагированию на ЧС с радиационным фактором, осуществляемых на отраслевом, региональном и федеральном уровнях.

Исследования социально-экономических аспектов развития атомной энергетики:

- разработка и реализация информационно-просветительских мероприятий по взаимодействию с общественностью в сфере обеспечения безопасности ОИАЭ.

ИБРАЭ РАН осуществляет широкое научное сотрудничество с ведущими российскими, зарубежными и международными организациями, в числе которых Ростехнадзор, Госкорпорация «Росатом», АО «Атомэнергопром», АО «ТВЭЛ», АО «Концерн Росэнергоатом», МЧС России, НЦУО и ВМФ МО РФ, Комиссариат по альтернативной и атомной энергии и Институт радиационной защиты и ядерной безопасности Франции, Ядерный исследовательский центр в Карлсруэ (Германия), МАГАТЭ, Всемирная ядерная ассоциация, Агентство по атомной энергии Организации экономического сотрудничества и развития и многие другие организации.

Фундаментальные и прикладные исследования в ИБРАЭ РАН ведутся в тесном сотрудничестве с НТЦ ЯРБ Ростехнадзора, НИЦ «Курчатовский институт», ИТЦП «ПРОРЫВ», ОИВТ РАН, ИНЭИ РАН, ИТ СО РАН, ИВМ РАН, ИПМ РАН, ИГЕМ РАН, ОКБ «Гидропресс», НПО «Маяк», РФЯЦ ВНИИЭФ, РФЯЦ ВНИИТФ, АО «АТОМПРОЕКТ», АО «Атомэнергопроект», АО «ВНИИАЭС», АО «ОКБМ Африкантов», АО «НИКИЭТ», АО «ГНЦ ФЭИ», ФГУП «ФЦ ЯРБ», ФГУП «Звездочка», СевРАО, ДальРАО и др.

В 2021 году в связи со сложной санитарно-эпидемиологической обстановкой ИБРАЭ РАН уделял особое внимание организации и обеспечению эффективной работы научных и административно-технических подразделений в режиме дистанционной работы сотрудников.

2

Основные итоги работ научных подразделений ИБРАЭ РАН в 2021 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 программных комплексов для моделирования процессов тепломассообмена (alipch@ibrae.ac.ru);

А. А. Белов — разработка моделей и программных комплексов для обоснования ядерной и радиационной безопасности (belov@ibrae.ac.ru);

А. В. Болдырев, к.ф.-м.н. — разработка программных комплексов для моделирования тепловыделяющих элементов (bav@ibrae.ac.ru);

П. Н. Вабищевич, д.ф.-м.н. — разработка эффективных численных методов решения краевых задач для систем нестационарных многомерных уравнений с частными производными (vab@ibrae.ac.ru);

А. Б. Исаков, к.ф.-м.н. — разработка сервисного программного обеспечения (aisakov@ibrae.ac.ru);

Д. А. Колташев, к.т.н. — разработка моделей и программных комплексов для нейтронно-физического расчета (kda@ibrae.ac.ru);

В. Н. Медведев, к.т.н. — разработка программных комплексов для решения задач механики строительных конструкций (cont@ibrae.ac.ru);

А. А. Сорокин, к.ф.-м.н. — разработка моделей и программных комплексов для моделирования поведения продуктов деления в контурах и помещениях АЭС (sorokin@ibrae.ac.ru);

А. С. Филиппов, д.т.н. — разработка моделей и программных комплексов для моделирования взаимодействия расплава с конструкциями на поздней стадии тяжелой аварии на АЭС, решение прикладных проблем механики сплошной среды (phil@ibrae.ac.ru);

В. В. Чуданов, к.ф.-м.н. — разработка эффективных численных алгоритмов, моделей и ПК для моделирования процессов теплогидродинамики, в том числе двухфазных (chud@ibrae.ac.ru).

НАПРАВЛЕНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

- 1 РАЗРАБОТКА, 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)
- 2 РАЗРАБОТКА КОМПОНЕНТОВ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ АЭС, В ЧАСТНОСТИ ИНТЕГРАЛЬНОЙ РАСЧЕТНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭНЕРГОБЛОКА С РУ БР-1200 И ИНТЕГРАЛЬНОЙ РАСЧЕТНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОДЭК С РУ БРЕСТ-ОД-300
- 3 РАЗРАБОТКА, ВАЛИДАЦИЯ И АТТЕСТАЦИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ РАСЧЕТНЫХ КОДОВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ АЭС С РЕАКТОРНЫМИ УСТАНОВКАМИ ТЕХНОЛОГИИ ВВЭР И РБМК, ВКЛЮЧАЯ ВОЗМОЖНОСТЬ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЯЖЕЛЫХ АВАРИЙ
- 4 ВЫПОЛНЕНИЕ РАСЧЕТОВ АЭС С РЕАКТОРНЫМИ УСТАНОВКАМИ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ ИХ БЕЗОПАСНОСТИ ИЛИ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНЫХ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ
- 5 РАЗРАБОТКА МЕТОДИК, МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И РАСЧЕТНЫХ КОДОВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЗАЩИТНЫХ ОБОЛОЧЕК АЭС РАЗЛИЧНОГО ТИПА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ И АВАРИЙНЫХ НАГРУЗОК
- 6 РАЗРАБОТКА И ОБОСНОВАНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ АЛГОРИТМОВ ДЛЯ ПРИБЛИЖЕННОГО РЕШЕНИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ЗАДАЧ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ НА ОСНОВЕ НЕОДНОРОДНЫХ АППРОКСИМАЦИЙ ПО ВРЕМЕНИ: ЯВНО-НЕЯВНЫЕ СХЕМЫ, СХЕМЫ РАСЩЕПЛЕНИЯ

ОСНОВНЫЕ ИТОГИ 2021 ГОДА

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

- усовершенствованный твэльный код **БЕРКУТ-У** аттестован в Ростехнадзоре для расчетного моделирования напряженно-деформированного состояния и температурного распределения в стержневых твэлах, наработки и радиоактивных взаимопревращений и миграции продуктов деления (ПД) в топливе, внутризёренного и межзёренного переноса радиоактивных ПД, термохимических превращений в нитридном или оксидном топливе реакторов на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем (рис. 2.1.1);
- разработаны и включены в код **БЕРКУТ-У/V2**, разрабатываемый на базе аттестованной версии кода, усовершенствованные модели,



Рис. 2.1.1 – Аттестационный паспорт программы для ЭВМ БЕРКУТ-У/V2.1

описывающие поведение оболочки твэла при облучении в реакторных установках на быстрых нейтронах. В состав расчетного кода включены модули:

- 1) **RadDam** для расчета скорости изменения изотопного и элементного состава оболочки твэла, а также набора повреждающей дозы;
- 2) **HeBub** для описания поведения дефектной структуры материала оболочки, зарождения и развития газонаполненной пористости в результате генерации трансмутационного гелия в материале оболочки при нейтронном облучении;
- 3) **NitCarb**, в котором реализована диффузионная модель, описывающая процесс азотирования и науглероживания оболочечной стали в результате взаимодействия с газовой фазой зазора «топливо–оболочка», содержащей газы N_2 , CO , CO_2 , выходящие из топлива в процессе облучения, а также с атомами азота и углерода, выбитыми из топлива осколками деления. Выполнена валидация моделей азотирования и науглероживания на результатах послереакторных исследований твэлов, облучавшихся в составе комбинированных экспериментальных тепловыделяющих сборок КЭТВС-6 и КЭТВС-7 в реакторной установке БН-600. Показано, что расчетные результаты по массовой доле азота и углерода в оболочке твэлов и экспериментальные данные находятся в хорошем согласии (рис. 2.1.2);

- завершена аттестация **теплофизических свойств свинцового теплоносителя** (теплопроводность, температуропроводность, энтальпия, теплоёмкость) в КАСД. Выпущены таблицы рекомендуемых справочных данных в области использования атомной энергии «Теплопроводность, температуро-

проводность, энтальпия, теплоемкость жидкого свинца в температурном интервале 630...1300 К» и таблицы стандартных справочных данных в области использования атомной энергии «Плотность свинца в температурном интервале 273,15...1500 К». Получен аттестационный паспорт справочных данных РСДАЭ 1-2021 от 29 сентября 2021 г. (рис. 2.1.3). Рекомендуемые значения свойств получены на основе результатов экспериментов, выполненных методами лазерной вспышки и калориметра смешения, и сопоставления или совместной их обработки с данными работ, выполненных ранее и опубликованных в открытой печати. Представлены оцененные значения неопределенностей рекомендованных данных во всем температурном интервале;

- завершены верификация и валидация интегрального кода для обоснования радиационной безопасности объектов топливного цикла **COMPLEX/V3.0** с целью подачи его на аттестацию в 2022 г. В состав кода COMPLEX/V3.0 входят следующие модули:

- **графическая оболочка пользователя** со средствами пре- и постпроцессинга (разработка ИБРАЭ РАН);
- **DOLCE VITA/V1.1** (нейтронно-физический расчетный код на базе диффузионного приближения, разработка ИБРАЭ РАН);
- **CORNER/V1.5** (нейтронно-физический расчетный код на базе приближения дискретных ординат на структурированных сетках, разработка ИБРАЭ РАН);
- **BPSD/V2.3** (код нуклидной кинетики, расчета активности и остаточного тепловыделения, разработка ИБРАЭ РАН);

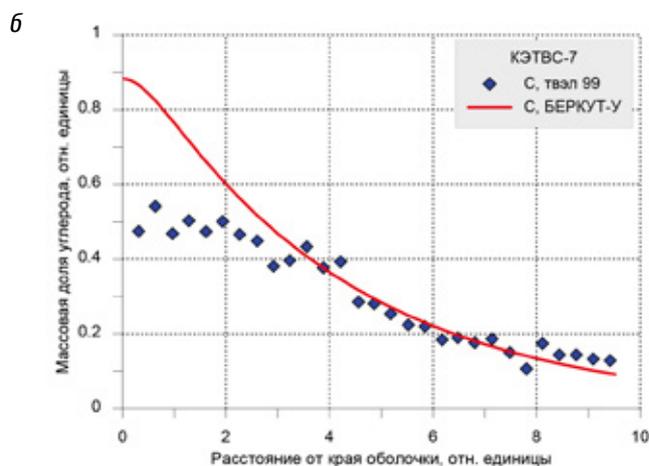
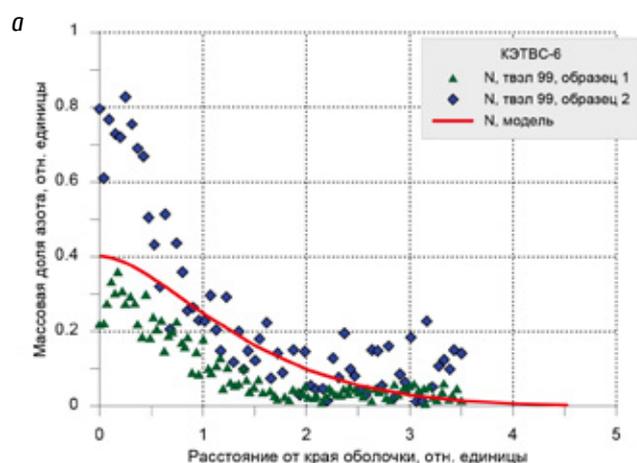


Рис. 2.1.2 — Сравнение расчетных и измеренных концентраций азота и углерода в оболочках твэлов:

а – профиль концентрации азота в оболочке твэла 99 КЭТВС-6; б – профиль концентрации углерода в оболочке твэла 99 КЭТВС-7



Рис. 2.1.3 – Аттестационный паспорт и таблицы рекомендуемых справочных данных в области использования атомной энергии по теплофизическим свойствам свинцового теплоносителя: а – аттестационный паспорт справочных данных; б – таблицы рекомендуемых справочных данных в области использования атомной энергии

- **ODETTA** версия 2.4 (нейтронно-физический расчетный код на базе приближения дискретных ординат на неструктурированных тетраэдральных сетках, разработка ИБРАЭ РАН);
- **MCU-FR/V1.0** (нейтронно-физический расчетный код на базе метода Монте-Карло, разработка НИЦ «Курчатовский институт»);
- **RASTAS_M_2** (расчет источника ионизирующих излучений, разработка АО «Прорыв»).

Матрица верификации и валидации кода **COMPLEX/V3.0** включает матрицы верификации и валидации отдельных модулей, а также задачи, сформированные на базе эксперимента по измерению мощности дозы от контейнера КТ-340 с ЭТВС-16 и ЭТВС-12 (рис. 2.1.4). Код COMPLEX/V3.0 должен стать российским аналогом широко используемого комплекса программ SCALE (США);

- выпущены обосновывающие материалы по системному теплогидравлическому коду **HYDRA-IBRAE/LM версии 1.9**. Версия 1.1 кода была аттестована в феврале 2018 г. При этом в связи с вопросами экспертов, привлеченных ФБУ «НТЦ ЯРБ» для анализа обосновывающих материалов, связанных

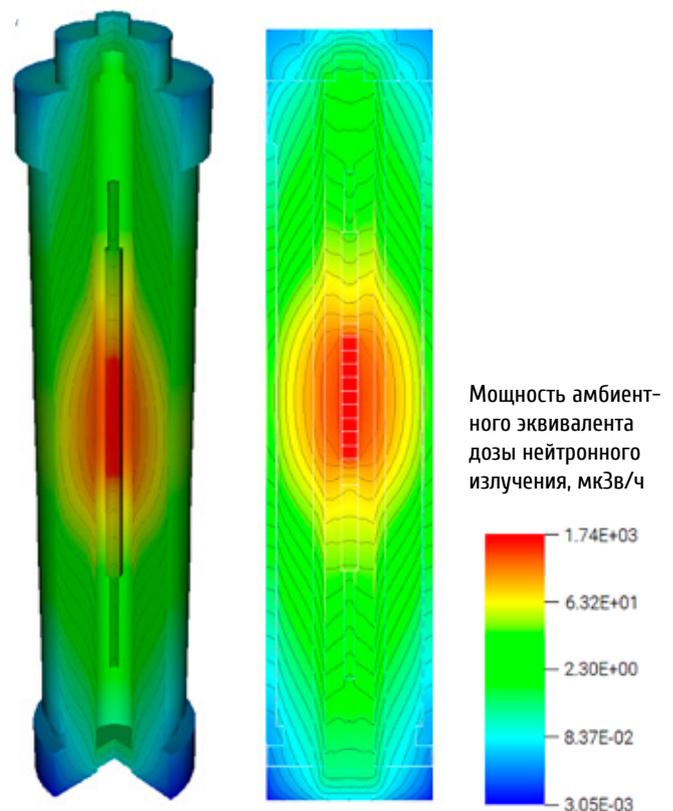


Рис. 2.1.4 – Распределение мощности AMBIENTНОГО эквивалента дозы нейтронного излучения в модели КТ-340 с ЭТВС-12

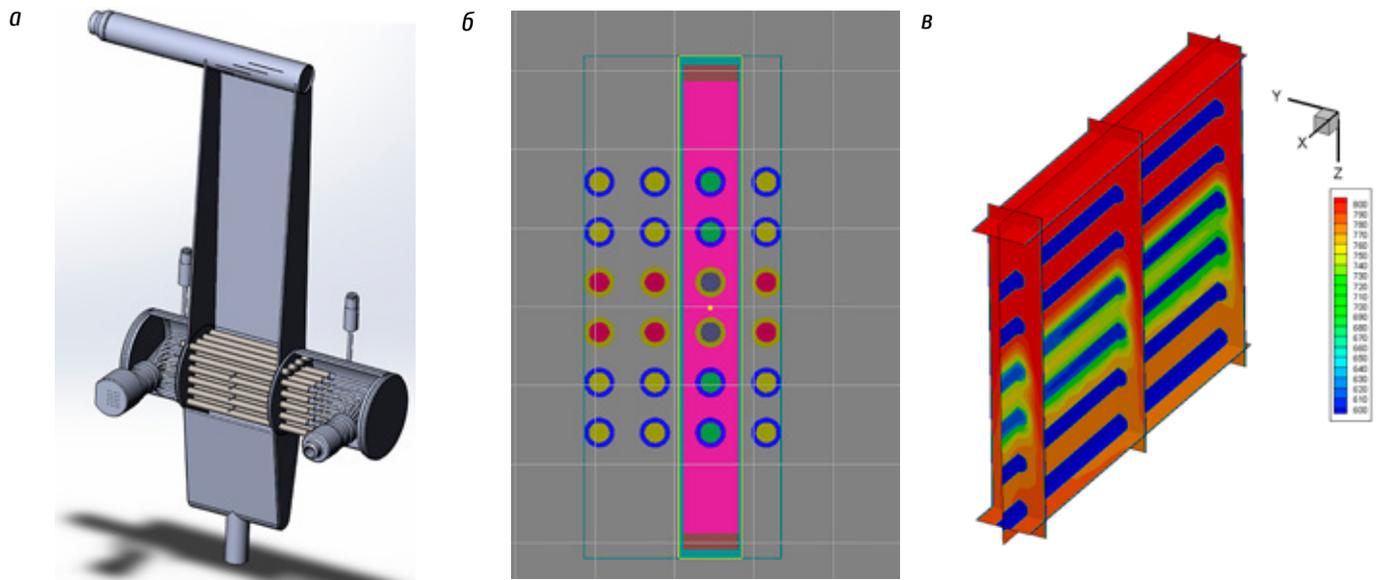


Рис. 2.1.5 — Моделирование проточного течения в пучке труб парогенератора:

а — вид модели парогенератора в сборке; б — моделируемая подобласть; в — трехмерное поле температур

с достаточностью экспериментальной базы для обоснованного использования кода для контурных расчетов реакторных установок со свинцовым теплоносителем, аттестационный паспорт был выдан сроком на 5 лет, а также включал ряд ограничений на использование кода. Поскольку версия кода 1.9 была доработана по сравнению с аттестованной в 2018 году версией 1.1, а также в связи с выпуском новой методики анализа неопределенностей в ИБРАЭ РАН, по последней версии кода были выполнены повторные расчеты экспериментов, на базе которых был получен аттестационный паспорт версии 1.1 кода, а также дополнительные расчеты ряда экспериментов, которые должны снять ограничения аттестационного паспорта. Среди них можно отметить следующие эксперименты: на установке СПРУТ на фрагментной модели ПГ РУ БРЕСТ-ОД-300, по исследованию теплопередачи между свинцом и водой (ФГУП «ГНЦ РФ – ФЭИ»); на стенде ИТ СО РАН по исследованию истечения пароводяной смеси в жидкий свинец; на экспериментальной установке со свинцовым теплоносителем ЭУСТ по исследованию теплопередачи в модельной тепловыделяющей сборке центральной зоны реактора БРЕСТ-ОД-300 (АО «НИКИЭТ»); на данных по режиму останова энергоблока с РУ БН-800; на результатах экспериментальных исследований, выполненных на интегральном экспериментальном стенде КМ-1 (ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова»). В результате выполненной валидации планируется снять

ограничения, препятствующие использованию расчетного кода для проведения контурных расчетов реакторных установок с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем;

- продолжено развитие двухфазного CFD модуля для расчета процессов тепло- и гидродинамики в двухфазной среде, включая трехкомпонентные смеси, с учетом межфазного тепло- и массообмена и уравнений состояния типа сжатого газа или уравнения состояния Noble-Able для слабосжимаемой среды. Проведена адаптация двухфазного CFD модуля к суперЭВМ петафлопсной производительности, в результате которой удалось значительно улучшить скорость обменов между расчетными узлами;
- проведены валидация и верификация модуля на базе LES приближения и DNS для моделирования однофазных течений в реакторных установках с жидкометаллическими теплоносителями (CONV-3D/V2/3.2). Валидация проведена на экспериментах, выполненных в разных геометриях: круглой трубе, кольцевом канале с преградой, прямоугольном канале, пучке труб парогенератора (рис. 2.1.5), с разными типами теплоносителя: вода, натрий, натрий-калий, сплав Розе, свинец. Выполнено сравнение результатов прямого численного моделирования (DNS) и в LES-приближении в сравнении с экспериментальными данными и аналитикой. Оценена погрешность полученных численных результатов в сравнении с экспериментальными данными.

2. Разработка расчетных моделей и интегрального кода для расчета аварийных процессов на энергоблоках с РУ РБМК-1000, включая стадию тяжелой запроектной аварии (работы выполнены по заказу АО «НИКИЭТ», генеральный заказчик — АО «Концерн Росэнергоатом»).

Разработка интегрального кода проводится на базе кода TITAN, разработанного в проекте по созданию программно-технического комплекса «Виртуально-цифровая АЭС с ВВЭР» для моделирования режимов нормальной эксплуатации и нарушений нормальной эксплуатации АЭС с реакторной установкой технологии ВВЭР. В 2021 г. были подготовлены и выпущены две версии кода:

- **TITAN-RBMK/V1.0**, позволяющая моделировать аварийные процессы на энергоблоках с РУ РБМК-1000 на стадии до начала изменения геометрии элементов а. з. реактора;
- **TITAN-RBMK/V2.0**, позволяющая моделировать аварийные процессы на энергоблоках с РУ РБМК-1000, включая процессы плавления и разрушения а. з., взаимодействия расплава с бетоном, выхода продуктов деления из твэлов и расплава. Версия 2.0 включает все возможности первой версии кода. Модульный состав интегрального кода показан на рис. 2.1.6.

Были доработаны модели отдельных модулей интегрального кода в соответствии со спецификой реакторных установок РБМК. В частности, в теплогидравлическом модуле была доработана

модель определения критического теплового потока в топливных каналах РУ РБМК-1000, разработана модель барабана-сепаратора; был разработан специализированный модуль RATNIK, предназначенный для расчета напряженно-деформированного состояния системы «труба топливного канала — зазор — графит» вместе с температурным полем в системе до и после контакта трубы и графита; в базу данных интегрального расчетного кода были включены свойства конструкционных материалов РУ РБМК-1000; кардинально переработан модуль разрушения активной зоны, получивший наименование SACURA и позволяющий определять поле температур в цилиндрической геометрии при плавлении/затвердевании различных материалов с последующим перемещением образовавшегося расплава под действием силы тяжести, силы трения с газовым потоком и трения со стенкой; адаптированы расчетные модели взаимодействия расплава с бетоном, образования водорода при взаимодействии расплавленных материалов с серпентинитовой засыпкой в рамках модуля взаимодействия расплава с бетоном CONCOR.

3. Разработка и аттестация расчетных кодов для анализа процессов в устройстве локализации расплава (УЛР) и взаимодействия расплава с бетоном (работы выполнены по заказу АО «ВНИИАЭС», генеральный заказчик — АО «Концерн Росэнергоатом»).

Были разработаны два расчетных кода для численного анализа взаимодействия расплава

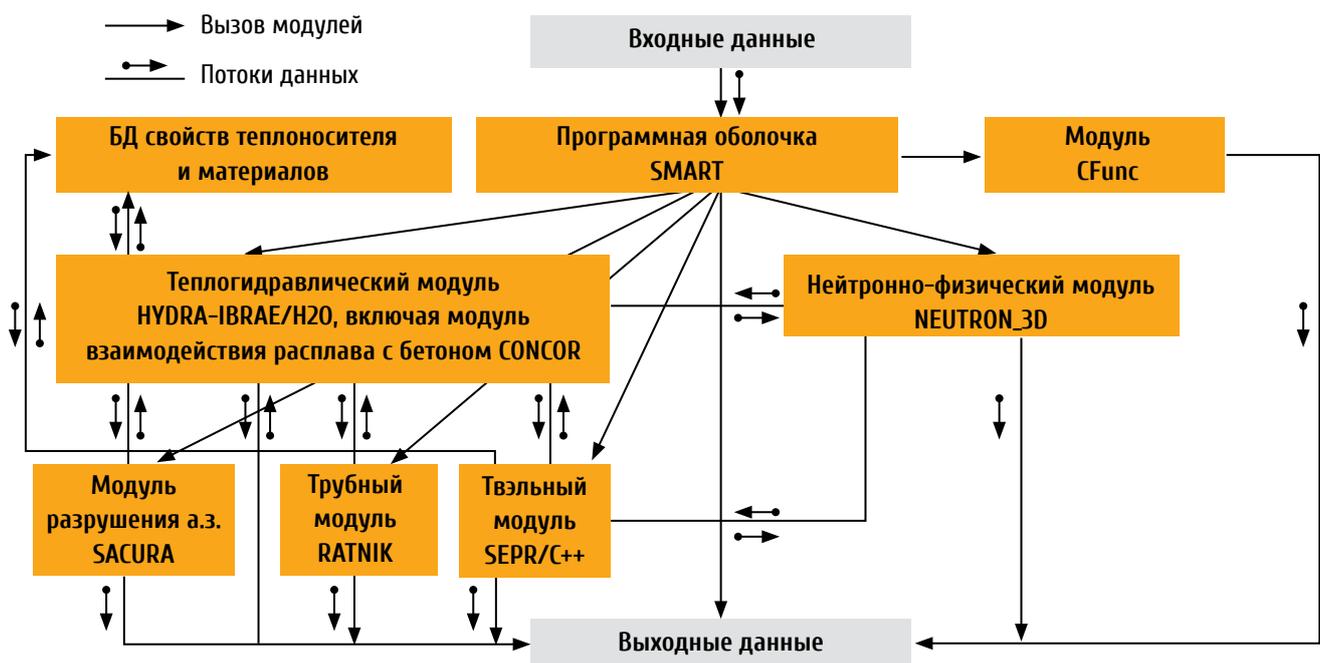


Рис. 2.1.6 — Схема взаимодействия модулей интегрального кода TITAN-RBMK/V2.0

с конструкциями на внереакторной фазе тяжелой аварии. Один из них, HEFEST_CC, предназначенный для моделирования устройства локализации расплава, был получен в результате глубокой переработки своего прототипа, созданного в рамках проекта по созданию программно-технического комплекса «Виртуально-цифровая АЭС с ВВЭР». Другой, МСС1_4_МСС1, предназначенный для моделирования взаимодействия расплав-бетон (ВРБ), разработан на основе имеющихся и вновь созданных моделей и алгоритмов.

В коде МСС1_4_МСС1 используются данные по моделированию предшествующих этапов тяжелой аварии. Код позволяет проводить расчёт ВРБ на АЭС с реакторными установками ВВЭР-1000 от выхода расплава в бетонную шахту до растекания по помещениям АЭС и застывания. Решение этой комплексной задачи кодами-аналогами неизвестно. Актуальность проблемы определяется наличием ряда работающих блоков с ВВЭР-1000, продление срока службы которых требует анализа безопасности при тяжелой аварии с плавлением активной зоны.

МСС1_4_МСС1 включает четыре основных подмодуля, разработанных с прицелом на сложную проблему моделирования ВРБ ВВЭР-1000:

- **HC_CALC:** 2D расчет методом конечных элементов (МКЭ) нестационарного теплопереноса в массиве бетона, стальной двери и др. Модель ползущего течения;
- **LAVA:** 0D МКЭ модель расплава (расслоение, корки, погранслои, внешний теплообмен);
- **FPMS:** Самосогласованная модель термохимии расплава, газа, бетона, включая химические реакции, выход ПД, свойства смесей, базу по свойствам компонентов;
- **Grid_M:** Эволюция и контроль области бетона: адаптивная сетка, контуры границ, граничный поток тепла в бетон.

Последовательный расчет включает моделирование основных событий ВРБ АЭС с РУ ВВЭР-1000:

- выход из корпуса реактора и формирование бассейна расплава в исходных границах;
- тепловая эрозия бетонных стен, пола, стальной двери шахты, расслоение расплава;
- разложение бетона, переход продуктов разложения в расплав, химические реакции, генерация водорода, выход ПД;
- проплавление двери шахты, растекание части расплава в помещения АЭС, остывание;
- долговременный тепловой режим стен и перекрытий помещений в контакте с расплавом.

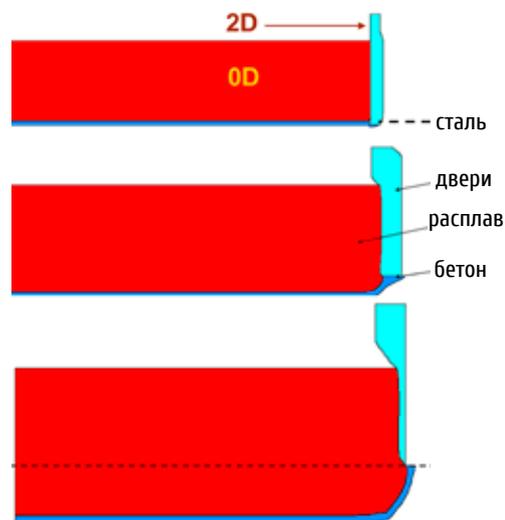


Рис. 2.1.7 – Расчёт ВРБ АЭС с РУ ВВЭР-1000: последовательные состояния бассейна расплава (вертикальное сечение) в контакте с бетоном (внизу) и стальной дверью (справа). Расчет на подвижной адаптивной сетке до проплавления двери

На рис. 2.1.7 приведен пример расчёта плавления бетона и стальной двери шахты.

В 2021 г. оба кода прошли экспертизу в ФБУ «НТЦ ЯРБ», получены рекомендации к аттестации кодов от всех экспертов, участвовавших в экспертизе. В 2022 г. результаты экспертизы должны быть рассмотрены на заседании Экспертного совета по аттестации программ для ЭВМ при Ростехнадзоре.

4. Расчетный анализ напряженно-деформированного состояния защитных оболочек АЭС с РУ ВВЭР-1000 (работы выполнены по заказу филиала АО «Концерн Росэнергоатом» Ростовская АЭС, АО «Контрольприбор», генеральный заказчик АО «Концерн Росэнергоатом» Калининская АЭС, а также в рамках плана НИР ИБРАЭ РАН).

Для анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) и обоснования эксплуатационной пригодности защитных оболочек (ЗО) в 2021 году была завершена адаптация экспертной системы оценки НДС ЗО применительно к энергоблокам № 1, 2, 3 Калининской АЭС: установлена экспертная система, в базу данных введены значения усилий на анкерах арматурных канатов и показания датчиков КИА, продемонстрирована последовательность работы с экспертной системой, включая этапы ввода данных об усилиях в армоканатах, задания каталога вывода результатов, проведения расчета, формирования протокола расчета. С помощью экспертной системы с учетом полученных данных об усилиях на анкерах ар-

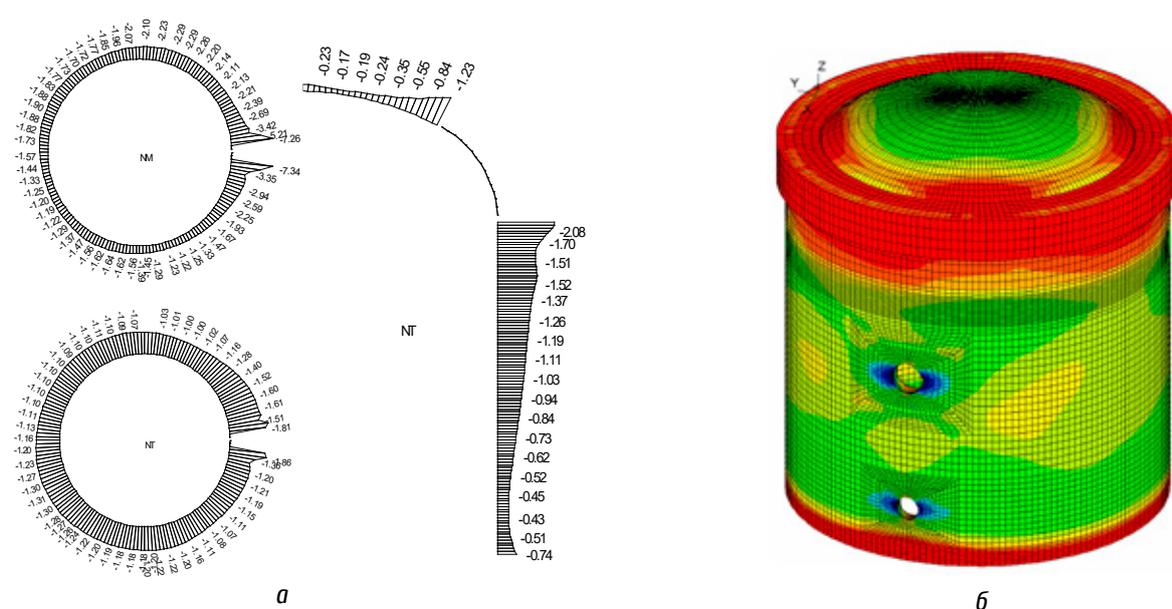


Рис. 2.1.8 — Эпюры меридиональных (NM) окружных (NT) усилий в начальный момент времени проектной аварии (а), распределение меридиональных напряжений от воздействия эксплуатационных нагрузок (б)

матурных канатов проведен расчет напряженно-деформированного состояния защитных оболочек энергоблоков № 1, 2, 3 Калининской АЭС с оценкой эксплуатационной пригодности по критериям действующих нормативных документов и с выводом информации в файл протокола, являющегося обоснованием достаточности уровня обжатия защитной оболочки при воздействии эксплуатационных и аварийных нагрузок (рис. 2.1.8).

Для решения вопроса по контролю условий безопасной эксплуатации системы преднапряжения защитных оболочек начаты работы по разработке альтернативного метода контроля НДС 30 энергоблоков № 1, 2 Ростовской АЭС на основе измерения геометрических параметров сооружения геодезическими методами и результатов расчета. В рамках данной работы разрабатывается методика контроля НДС 30 АЭС, далее будет производиться апробация альтернативного метода оценки на действующих энергоблоках с последующей аттестацией.

Также ИБРАЭ РАН в рамках плана НИР выполнено развитие новых численных методик по моделированию динамического воздействия на защитную оболочку реакторного отделения АЭС обрыва напряженного арматурного каната. Поскольку в практике эксплуатации АЭС с ВВЭР-1000 имели место случаи обрыва арматурных канатов, специалистами института была выполнена разработка методики и расчетной модели защитной оболочки с учетом физико-механических и деформационных характеристик материалов сооружения. В результате моделирования

были получены зависимости от времени динамического отклика (перемещений) наиболее нагруженных зон защитной оболочки от обрыва напряженного арматурного каната.

5. Разработка и обоснование вычислительных алгоритмов для приближенного решения нестационарных задач математической физики на основе неоднородных аппроксимаций по времени: явно- неявные схемы, схемы расщепления (работы выполнены в рамках плана НИР ИБРАЭ РАН).

Численное решение нестационарных краевых задач для уравнений с частными производными базируется на использовании чаще всего неявных аппроксимаций по времени, которые обеспечивают безусловную устойчивость по начальным данным и правой части. Явные схемы более просты для нахождения приближенного решения на новом слое, но имеют жесткие ограничения на шаги по времени. Целью многих исследований является построение схем, наследующих, в той или иной мере достоинства явных и неявных аппроксимаций: сохраняли устойчивость, но были бы более удобными для вычислительной реализации. Упрощение задачи на новом слое без потери устойчивости достигается, в частности, использованием неоднородных аппроксимаций по времени. Широкое распространение получили явно-неявные схемы. В этом случае оператор задачи расщепляется на два операторных слагаемых с выделением приемлемого для вычислительной реализации слагаемого, которое берется с верхнего слоя, а другое слагаемое — с нижнего слоя по времени.

В схемах расщепления используется аддитивное представление оператора задачи. Переход на новый слой по времени осуществляется решением эволюционных задач для отдельных операторных слагаемых. Во многих нестационарных задачах вычислительно приемлемые подзадачи имеет смысл строить на основе декомпозиции решения, когда более простые задачи формулируются для отдельных составляющих решения. Построены и исследованы схемы расщепления для приближенного решения задачи Коши в конечномерном гильбертовом пространстве для эволюционного уравнения первого порядка. Отдельное внимание уделено схемам расщепления решения для эволюционных уравнений второго порядка.

Декомпозиция решения проводится, в частности, на прямой сумме подпространств. Предложен новый вариант, который связывается с аддитивным представлением единичного оператора на основе операторов ограничения и продолжения. Схемы расщепления строятся на основе явно-неявных аппроксимаций по времени при выделении диагональной части или треугольного расщепления соответствующей операторной матрицы. Устойчивость предложенных трехслойных схем расщепления решения исследуется с привлечением общих результатов теории устойчивости операторно-разностных схем.

Полученные специалистами Отделения результаты научно-исследовательских работ были представлены на ведущих российских и международных конференциях, где получили высокую оценку научного сообщества.

В частности, на 13-й международной конференции по крупномасштабным научным вычислениям (The 13th International Conference on Large-Scale Scientific Computations (LSSC), 2021), прошедшей в Болгарии. Традиционно конференция была посвящена актуальным вопросам суперкомпьютерного моделирования, вычислительной и прикладной математики. Конференция проводилась в смешанном формате. Профессор **П.Н. Вабищевич** (ИБРАЭ РАН) представил приглашенный секционный доклад, в котором изложил новые научные результаты по построению вычислительных алгоритмов приближенного решения задач для неклассических эволюционных уравнений, которые характеризуются присутствием дробной степени оператора. Им построены и исследованы безусловно устойчивые схемы расщепления при рациональной аппроксимации дробной степени оператора. Переход на новый слой по времени обеспечивается решением последовательности стандартных задач.

КЛЮЧЕВЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАБОТ

1. Bolshov L. A., Strizhov V. F., Mosunova N. A., Pribaturin N. A. Codes of new generation – the industry platform for the safety assessment in the Proryv project // Nuclear Engineering and Design, 2022, vol. 390, 111688, 9 p.
2. Efendiev Yalchin, Vabishchevich Petr N. Splitting methods for solution decomposition in nonstationary problems // Applied Mathematics and Computation, 2021, vo. 397, article 125785, 10 p. DOI: 10.1016/j.amc.2020.125785.
3. Vabishchevich P. N. Solution Decomposition Schemes for Second-Order Evolution Equations // Differential Equations, 2021, vol. 57, no. 7, pp. 848–856. DOI: 10.1134/S0012266121070028.
4. Альмяшев В. И., Хабенский В. Б., Крушинов Е. В., Витоль С. А., Котова С. Ю., Шевченко Е. В., Каляго Е. К., Сулацкий А. А., Стрижов В. Ф., Мосунова Н. А. Экспериментальное исследование высокотемпературного взаимодействия стали со свинцовым теплоносителем // Теплофизика высоких температур. – 2021. – Т. 59. – № 5. – С. 762–769. DOI: <https://doi.org/10.31857/S004036442105001X>.
5. Polovnikov P. V., Tarasov V. I., Veshchunov M. S. Modelling of breakaway swelling in intermetallic fuels during low temperature irradiation // Journal of Nuclear Materials, 2022, vol. 558, 153362. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2021.153362>
6. Березнев В. П., Белов А. А., Колташев Д. А. Использование методов первого и последнего столкновения в программе ODETTA при решении задач радиационной защиты // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2021. – № 1. – С. 15–26 – DOI: 10.55176/2414-1038-2021-1-15-26
7. Медведев В. Н., Скорикова М. И., Киселев Ал. С., Киселев А. С., Стрижов В. Ф., Ульянов А. Н. Влияние работы полярного крана на напряженно-деформированное состояние защитной оболочки АЭС // Атомная энергия. – 2021. – Т. 130. – № 4. – С. 215–218.
8. Чуданов В. В., Аксенова А. Е., Леонов А. А., Макаревич А. А. Моделирование двухфазного течения трехкомпонентной смеси с учетом тепломассообмена // Атомная энергия. – 2021. – Т. 130. – Вып. 3. – С. 137–142.
9. Чуданов В. В., Аксенова А. Е., Первичко В. А. Расчет параметров течения в пучках твэлов ТВС с дистанционирующими решетками с помощью кода CONV-3D // Атомная энергия. – 2021. – Т. 130. – Вып. 5. – С. 293–295.



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

В. Н. Семенов, д.ф.-м.н. — модели процессов, протекающих на АЭС и в окружающей среде при тяжелых авариях (sem@ibrae.ac.ru);

К. С. Долганов, к.т.н. — численное моделирование запроектных аварий, включая тяжелые аварии с плавлением активной зоны, на АЭС с реакторными установками ВВЭР, РБМК, ВВР (dolganov@ibrae.ac.ru);

Е. А. Долженков — численное моделирование запроектных аварий, включая тяжелые аварии с плавлением активной зоны, на АСММ с РУ РИТМ 200 (dolzhenkov@ibrae.ac.ru);

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 (tdyu@ibrae.ac.ru);

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 (philippov@ibrae.ac.ru);

Р. В. Чалый — разработка физико-математических моделей и программного обеспечения для анализа проектных, запроектных и тяжелых аварий на АЭС с РУ БН (chalyy@ibrae.ac.ru);

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 (atan@ibrae.ac.ru).

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

- 1 РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ ИНТЕГРИРОВАННОГО ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА СОКРАТ ДЛЯ ДЕТЕРМИНИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ТЯЖЕЛЫХ АВАРИЙ НА АЭС С РЕАКТОРАМИ ВВЭР, БН И РИТМ
- 2 АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ И РАЗРАБОТКА ИНЖЕНЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ АНАЛИЗА ПРЕДСТАВИТЕЛЬНЫХ АВАРИЙ НА ТЕРМОЯДЕРНЫХ УСТАНОВКАХ ТИПА ИТЭР
- 3 ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ТЯЖЕЛЫХ АВАРИЙ НА АЭС С РЕАКТОРАМИ ВВЭР И БН В РАМКАХ ОБОСНОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ АЭС
- 4 НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ПОДДЕРЖКА РАБОТ ПО АНАЛИЗУ БЕЗОПАСНОСТИ АЭС ПРИ ТЯЖЕЛЫХ АВАРИЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА СОКРАТ, ВКЛЮЧАЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С ЗАРУБЕЖНЫМИ ЗАКАЗЧИКАМИ ПРИ ЭКСПЕРТИЗАХ ДОКУМЕНТАЦИИ СОКРАТ И РЕЗУЛЬТАТОВ АНАЛИЗА ТЯЖЕЛЫХ АВАРИЙ
- 5 УЧАСТИЕ В ВЫПОЛНЕНИИ НИОКР «СОЗДАНИЕ СИСТЕМЫ СКВОЗНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РАЗВИТИЯ АВАРИЙНЫХ ПРОЦЕССОВ И ПАРАМЕТРОВ РАДИАЦИОННОЙ ОБСТАНОВКИ В СЗЗ И ЗН АЭС В СЛУЧАЕ ТЯЖЕЛЫХ ЗАПРОЕКТНЫХ АВАРИЙ НА АЭС С ВЫХОДОМ РАДИОАКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ В АТМОСФЕРУ»
- 6 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 2021 ГОДА

1. В рамках процедуры аттестации программы для ЭВМ **СОКРАТ-В1/В2** завершены работы по депонированию версии в НТЦ ЯРБ и формированию **расширенного Отчета о верификации**, включающего результаты численного моделирования интегральных экспериментов, экспериментов по исследованию отдельных явлений и сопоставление результатов расчетов представительных аварий с реперными данными, полученными по аттестованным теплогидравлическим программам ТРАП, КОРСАР/ГП. Отчет о верификации дополнен описанием новых моделей теплогидравлики защитной оболочки РУ, позволяющих выполнять интегральные расчеты тяжелых аварий в рамках единого подхода к моделированию теплогидравлических процессов без привлечения сторонних контейментных программ.

2. Успешно завершена экспертиза Отчета о верификации Программы для ЭВМ (ПрЭВМ) **СОКРАТ/В3 в Ростехнадзоре**. Тем самым подтверждена возможность применения ПрЭВМ СОКРАТ/В3 для решения задач обоснования безопасности энергоблоков АЭС с реакторами ВВЭР при тяжелых авариях, в том числе в ходе лицензирования АЭС, разработки и верификации руководств по управлению тяжелыми ава-

риями, детерминистической поддержки вероятного анализа безопасности.

3. С целью научной и практической поддержки отраслевых организаций, использующих версии программы для ЭВМ **СОКРАТ** в своей деятельности по разработке, реализации и обоснованию безопасности проектов АЭС в России и за рубежом, **выполнены работы по взаимодействию с российскими и зарубежными экспертами**, представляющими надзорные органы:

- подготовлены и переданы ответы на вопросы, поступившие в ходе экспертизы Инозаказчиком результатов использования ПрЭВМ СОКРАТ/В3 для обоснования безопасности проекта **АЭС «Ханхикиви»** (Финляндия);
- выполнен расчетный анализ эффективности мер, предпринимаемых оператором по снижению давления в первом контуре для повторного залива водой активной зоны **АЭС «Аккую»** (Турция);
- подготовлены ответы на вопросы НТЦ ЯРБ к методикам и моделям, используемым **ОКБ «Гидропресс»** при анализе безопасности РУ ВВЭР.

4. В рамках разработки и демонстрации **методического подхода для учета погрешностей и неопределенностей расчетов при анализе проектных и запроектных аварий АС с РУ БН** проведены следующие работы:

- выполнен **анализ российских нормативных документов**, по результатам которого установлены требования к проведению анализа неопределенностей проектных и запроектных аварий. Рассмотрены подходы МАГАТЭ при выполнении детерминистического анализа безопасности;
- выполнен **анализ существующих методик по оценке влияния погрешностей и неопределенностей**. Приведены краткие характеристики методик, основанных на подходах экстраполяции неопределенностей и трансформирования (распространения) неопределенностей входных параметров. Отмечены преимущества и проблемы использования методик применительно к расчетам ПА и ЗПА для удовлетворения требований российской нормативной базы;
- выполнены **выбор и адаптация методик анализа неопределенности и порядка их реализации к РУ БН**. Для ЗПА применен алгоритм анализа на основе приложения 4 РБ-166-20 и методики ASME V&V20, для ПА выработан подход, основанный на приложении 3 РБ-166-20 и руководстве МАГАТЭ к детерминистическому анализу безопасности;
- выполнены **расчеты представительных сценариев ПА и ЗПА** с учетом неопределенностей входных параметров.

5. Выполнены **детерминистические расчеты тяжелых аварий** в поддержку вероятностного анализа безопасности второго уровня **для энергоблока №2 Ростовской АЭС и для энергоблока №4 Калининской АЭС** (заказчик — АО «Атомэнергопроект»).

6. В рамках **исследования преимуществ использования аварийно-устойчивого топлива с оболочками из ZrCr, FeCrAl или 42ХНМ для повышения водородной взрывобезопасности на АЭС с ВВЭР** выполнен подробный анализ современных экспериментальных данных по окислению кандидатных материалов в паровой среде, определены механизмы окисления, адаптированы модели окисления в интегральной программе СОКРАТ-В1/В2. На основании результатов расчетного исследования ТА на ВВЭР с оболочками из сплавов FeCrAl и ZrCr показано отсутствие принципиальных преимуществ этих материалов по источнику водорода

на внутрикорпусной стадии, что обусловлено ускорением кинетики окисления вблизи точки плавления.

7. С целью реализации **перспектив совместного использования интегральных кодов и CFD-кодов для анализа водородной безопасности АЭС** определены источники водорода в защитную оболочку для обоснованного перечня представительных сценариев ТА на российских АЭС с разными проектами ВВЭР. Представительность полученных источников обоснована охватом широкого диапазона условий, характеристик, эксплуатационных состояний и мест выхода водорода в защитную оболочку.

8. Выполнен предварительный **численный анализ спектра тяжелых аварий на АСММ с РУ РИТМ 200**. Получены исходные данные для программы экспериментальных исследований — характерные диапазоны параметров, описывающих состояние РУ в условиях тяжелых аварий. Выполнены аналитические исследования возможности использования отечественных и зарубежных тяжелоаварийных кодов для моделирования динамики разрушения активной зоны РУ РИТМ 200 при тяжелой аварии (заказчик — АО «ОКБМ Африкантов»).

9. Совместно с ЦНТП ИБРАЭ РАН был выполнен **третий этап работ по НИОКР «Создание системы сквозного моделирования развития аварийных процессов и параметров радиационной обстановки в СЗЗ и ЗН АЭС в случае тяжелых запроектных аварий на АЭС с выходом радиоактивных веществ в атмосферу»**. В рамках выполнения этапа были проведены демонстрационные расчеты радиационных последствий для нескольких сценариев тяжелых аварий на АЭС с учетом их географического расположения для 4 пилотных площадок. Демонстрационные расчеты показали работоспособность разработанного на прошлом этапе работы программного модуля для анализа процессов внутри реактора и состояния атмосферы под защитной оболочкой АЭС и его совместимость с остальными компонентами системы сквозного моделирования.

10. С целью обеспечения **программно-методической базы для обоснования безопасности объектов типа ИТЭР** начата разработка программы для ЭВМ для расчета источников водорода и инженерной оценки водородной взрывобезопасности на ТЯУ типа ИТЭР. Проанализирована феноменология представительных сценариев аварий, определены основные системы для моделирования, разработана нодализационная схема петли охлаждения дивертора и выполнена оценка характерных

источников водорода. Составлена программа исследований до 2024 г. и на перспективу до 2030 г.

11. Выполнен комплекс работ в рамках международных проектов:

- в рамках проекта **АЯЭ ОЭСР ARC-F** выполнено расчетное исследование условий для взрыва водорода на энергоблоке №1 **АЭС «Фукусима-1»**. Показано, что в центральном зале условия для детонации водородовоздушной смеси сложились за несколько часов до фактически произошедшего взрыва, а частичное разрушение плит биозащиты и более низкие мощности доз вблизи плит по сравнению с энергоблоками №2 и №3 могут объясняться горением водорода в помещении над крышной контейнерной;
- в рамках координационного исследовательского проекта **МАГАТЭ CRP I31033**, посвященного совершенствованию практического применения методологий неопределенности и чувствительности для анализа тяжелых

аварий на водоохлаждаемых реакторах, в 2021 г. сотрудниками ИБРАЭ выполнен анализ неопределенностей и чувствительности эксперимента QUENCH-06 и внутрикорпусной стадии тяжелой аварии «большая течь с обесточиванием энергоблока» по программе для ЭВМ СОКРАТ/ВЗ. Результаты были представлены на третьем координационном совещании, которое прошло онлайн с 8 по 10 ноября 2021 г.

- в рамках международного проекта **PKL Phase 4** выполнен анализ экспериментов, направленных на изучение явлений концентрирования и разбавления борной кислоты в первом контуре РУ. Показана возможность моделирования по программе для ЭВМ СОКРАТ/ВЗ процесса разбавления борной кислоты в гидрозатворах холодных ниток конденсатом из парогенератора и процесса роста концентрации в корпусе РУ. Получено хорошее согласие с наблюдениями осаждения борной кислоты в а. з. в условиях работы САОЗ НД при аварии «большая течь».

КЛЮЧЕВЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАБОТ

1. Dolzhenkov E. A., Dolganov K. S., Kapustin A. V., Kiselev A. E., N. I. Ryzhov, T. A. Yudina. Estimation of system code SOCRAT/V3 accuracy to simulate the heat transfer in a pool of volumetrically heated liquid on the basis of BAFOND experiments // *Annals of Nuclear Energy*, 2021, vol. 151.
2. Kapustin A. V., Melikhov V. I., Melikhov O. I., Saleh B., Finoshkina D. V. Thermal detonation wave in liquid lead-water mixture // *Journal of Physics: Conference Series*, 2088 (2021), 012027.
3. Н. А. Афанасьев, Головизнин В. М., Семенов В. Н., Сипатов А. М., Нестеров С. С. Прямое моделирование термоакустической неустойчивости в газогенераторах по схеме «КАБАРЕ» // *Математическое моделирование*, 2021. — Т. 33. — № 2. — С. 3–19.
4. Dolganov K. S., Dolzhenkov E. A., Fokin A. L., Kiselev A. E., Tomashchik D. Yu., Semenov V. N. Applicability of the nuclide kinetics fast estimate model for severe accident codes // *Annals of Nuclear Energy*, March 2022, vol. 167, 108858.
5. Morozov V. B., Kiselev A. E., Kiselev A. A., Dolganov K. S., Tomashchik D. Yu., Krasnoperov S. N. Issues of Safety Assessment of New Russian NPP Projects in View of Current Requirements for the Probability of a Large Release // *Nuclear Technology*, 2021, vol. 207 (2), pp. 204–216.
6. Volkov G. J., Elkin I. V., Kapustin A. V., Melikhov V. I., Melikhov O. I., Nikonov S. M. and Trubkin O. N. Experimental and Calculated Studies of Condensation-Induced Water Hammer // *Thermal Engineering*, 2021, vol. 68, no. 2, pp. 142–151.
7. Волков Г. Ю., Ёлкин И. В., Капустин А. В., Мелихов В. И., Мелихов О. И., Никонов С. М., Трубкин О. Н. Экспериментально-расчетные исследования конденсационных ударов // *Теплоэнергетика*. — 2021. — № 2. — С. 68–78.
8. Bakin R. I., Gubenko I. M., Dolganov K. S., Ignatov R. Y., Ilichev E. A., Kiselev A. A., Krasnoperov S. N., Konyaev P. A., Rubinshtein K. G., Tomashchik D. Y. Application of ensemble method to predict radiation doses from a radioactive release during hypothetical severe accidents at Russian NPP // *Journal of nuclear science and technology*, 2021, vol. 58, iss 6, pp. 635–650.



РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЯДЕРНЫХ УСТАНОВКАХ

НОВОСИБИРСКИЙ ФИЛИАЛ ИБРАЭ РАН



Директор филиала

Н. А. Прибатурин

чл.-корр. РАН

(nialp@ibrae.ac.ru)



Заведующий отделом

С. И. Лежнин

д.ф.-м.н.

КЛЮЧЕВЫЕ СПЕЦИАЛИСТЫ

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

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 2021 ГОДА

1. Совместно со специалистами ИТ СО РАН выполнены экспериментальные исследования, направленные на установление закономерностей двухфазной среды при инжекции потока газа в неподвижный свинцово-висмутовый теплоноситель, находящийся в вертикальном цилиндрическом канале. Для проведения экспериментов был использован гидродинамический контур с рабочими участками в виде вертикальных цилиндрических каналов различного диаметра. Стенд содержал бак с жидким металлом, переливной бак, циркуляционный насос, узел ввода газовой фазы, систему поддержания заданной температуры всех элементов стенда. Для выполнения экспериментов были использованы 3 цилиндрических вертикальных рабочих участка с внутренним диаметром 8, 20 и 30 мм, выполненные из кварцевой трубы. В экспериментах был использован свинцово-висмутовый расплав, находящийся при температуре 160 °С.

При проведении экспериментов была обеспечена однородность температуры всех конструктивных элементов контура для исключения областей «захолаживания» теплоносителя при его циркуляции в контуре. Для этого все элементы гидродинамического стенда в ходе проведения экспериментов разогревались до температуры жидкого металла.

Двухфазная среда создавалась путем ввода в свинцово-висмутовый расплав инертного газа аргона. Для этого использовался установленный в нижней части рабочих участков генератор пузырьков, основным элементом которого являлось сопло внутренним диаметром 3 мм.

Аргон подавался из баллона высокого давления при комнатной температуре на входе в рабочий участок. Приведенный к нормальным условиям расход газа контролировался с помощью регуляторов-измерителей и находился в пределах 100—3200 мл/мин.

Основные измерения по определению эволюции газовых пузырей были проведены при неподвижной жидкой фазе. Проводилась фиксация формы газовых пузырей, поднимающихся в неподвижном расплаве металла, в зависимости от расхода газа. При минимальном расходе газа в жидком металле появляются маленькие пузырьки с формой, близкой к сферической. На рис. 2.1.9 это показано на примере движения пузырька в трубе диаметром 20 мм. Эволюция пузырька в среде расплава металла характеризуется появлением сильной неустойчивости на поверхности пузырька.

При увеличении расхода газа появляются пузыри большего размера в виде полусферического сегмента, заполняющего поперечное сечение канала. Дальнейшее увеличение расхода газа приводит к появлению в жидком металле газовых снарядов. Однако их форма существенно отличается от «классической» формы пузыря Тейлора в круглой трубе, фиксируемой в двухфазных течениях с «неметаллическими» жидкостями. Они становятся неустойчивы при движении в жидком металле, а их эволюция напоминает «винтообразное» движение (рис. 2.1.10). Измерения показали, что не существует стабильной пленки жидкости между поверхностью снаряда и стенкой канала, поверхность раздела фаз подвержена интенсивным возмущениям.

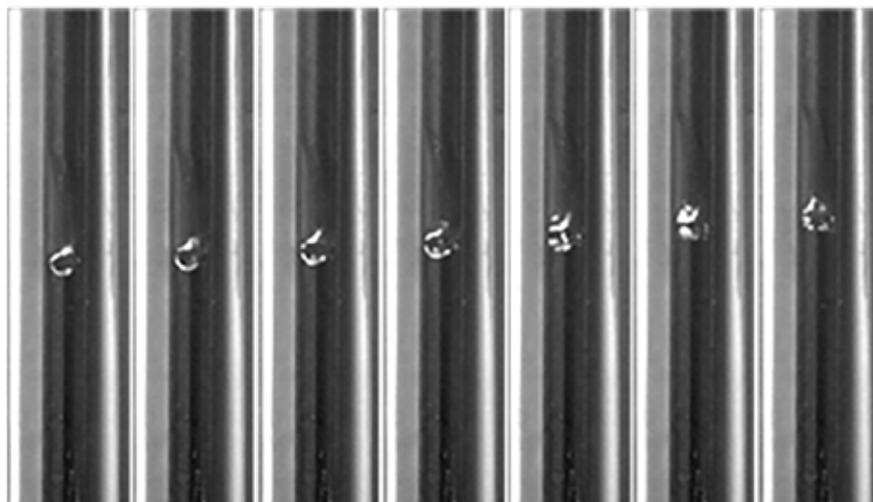


Рис. 2.1.9 – Газовый пузырек, всплывающий в трубе диаметром 8 мм со свинцово-висмутовым расплавом и температурой расплава 160 °С

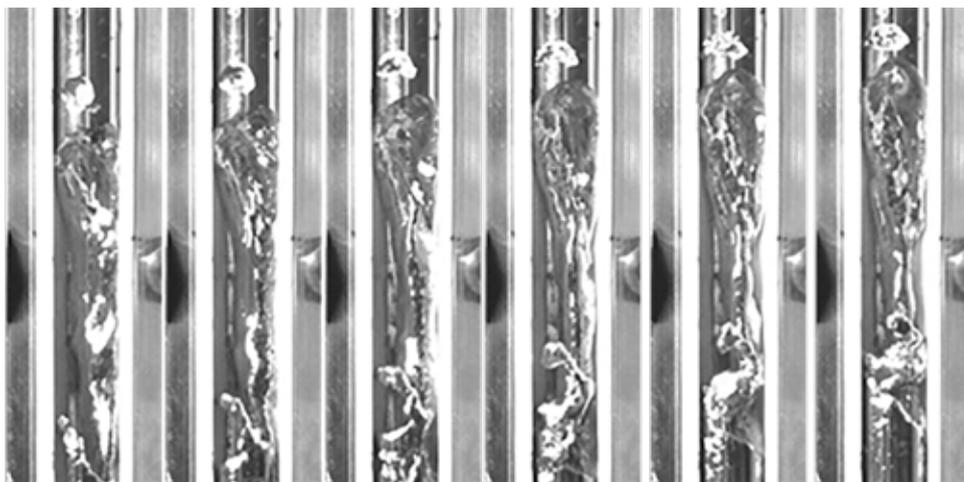


Рис. 2.1.10 — Эволюция газового снаряда в трубе диаметром 20 мм со свинцово-висмутовым расплавом с температурой 160°C

Чем больше диаметр канала, тем более межфазная граница подвержена возмущениям, стремящихся изменить форму крупных пузырей и газовых снарядов. Это приводит не только к постоянному изменению формы пузырей, но и разрушает газовые образования в расплаве металла, приводя к значительному уширению гистограммы распределения газосодержания при снарядном режиме течения по сравнению с пузырьковым режимом совместного течения жидкого металла и газовой фазы (рис. 2.1.11).

Совместно со специалистами ИТ СО РАН реализован на практике режим естественной циркуляции свинцово-висмутового расплава в прямоугольной полости, на вертикальных противоположных стенках которой осуществляются подвод и сток тепла. Схема полости изображена на рис. 2.1.12а. Размеры полости были следующие: высота 364 мм, ширина 185 мм, глубина

40 мм. Полость заполнялась жидким свинцово-висмутовым расплавом, исходная температура расплава составляла около 155°C и была однородна по всему объему полости. На рис. 2.1.12б показано начальное распределение температуры расплава по поперечному сечению полости.

Создание градиента температуры по поперечному сечению полости проводилось после выхода температуры расплава на равновесную температуру. Для этого одна из вертикальных стенок полости нагревалась выше равновесной температуры, а противоположная вертикальная стенка охлаждалась. Таким образом создавался градиент температуры по поперечному сечению полости. На рис. 2.1.13 приведено типичное распределение температуры по ширине полости, начиная от «горячей» стенки и до «холодной» стенки.

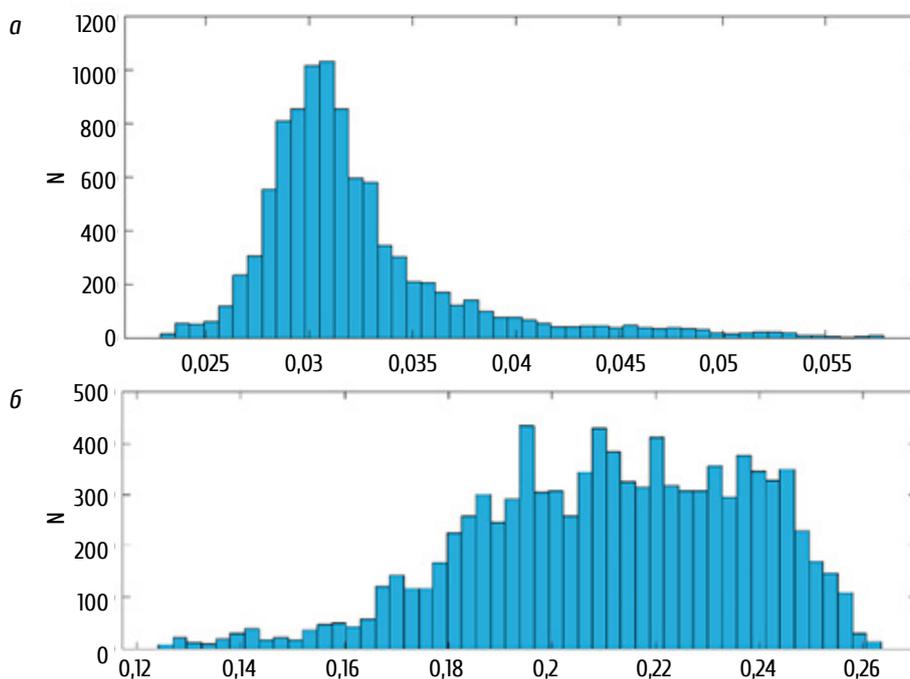


Рис. 2.1.11 — Гистограммы распределения газосодержания: а — пузырьковый режим течения; б — снарядный режим течения

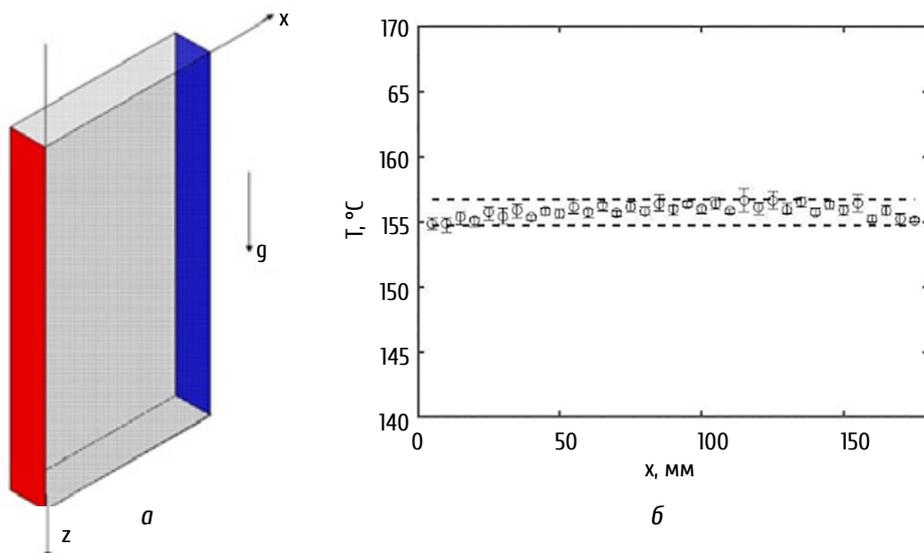


Рис. 2.1.12 – Схема замкнутой прямоугольной полости (а) и начальное распределение температуры по поперечному сечению полости (б)

Свободно-конвективное движение расплава в полости приводит к формированию восходящего и нисходящего потоков жидкого металла соответственно возле нагреваемой и охлаждаемой стенок, формируя внутри полости циркуляционное движение. Интенсивность этой циркуляции тем выше, чем больше разница между температурами «горячей» и «холодной» стенок полости.

Проведена доработка расчетного кода ЕВКЛИД/V2 для учета образования частиц оксидов свинца и продуктов активации в свинцовом теплоносителе, их переноса в теплоносителе, кристаллизации растворенных оксидов на стенках канала, осаждения частиц на стенки каналов. Разработана система аналитических тестов, на базе которой проведена верификация кода ЕВКЛИД/V2.

В качестве одного из примеров валидации модуля массопереноса на рис. 2.1.14 приведены результаты расчеты процессов осаждения изо-

топа ^{54}Mn в ПТО РУ БН-600 за 20 лет эксплуатации. С учетом неопределенности исходных данных результаты расчетов и экспериментов качественно и количественно согласуются между собой.

Проведен расчет эксперимента, выполненного на стенде АО «ГНЦ РФ-ФЗИ» по росту оксидного слоя на поверхности стали ЭП823-Ш. Погрешность расчета толщины оксидной пленки составила 55%. Результаты расчета в сравнении с экспериментом представлены на рис. 2.1.15.

Проведена доработка модуля плавления/затвердевания теплоносителя с учетом пространственных эффектов. Указанная модель учитывает затвердевание теплоносителя как на теплообменных поверхностях, так и в ядре потока. Моделирование затвердевания теплоносителя на теплообменных поверхностях проводилось с использованием тяжелоаварийного модуля SAFR (в 2D постановке) и теплогидравлического модуля HYDRA-IBRAE/LM (в 3D

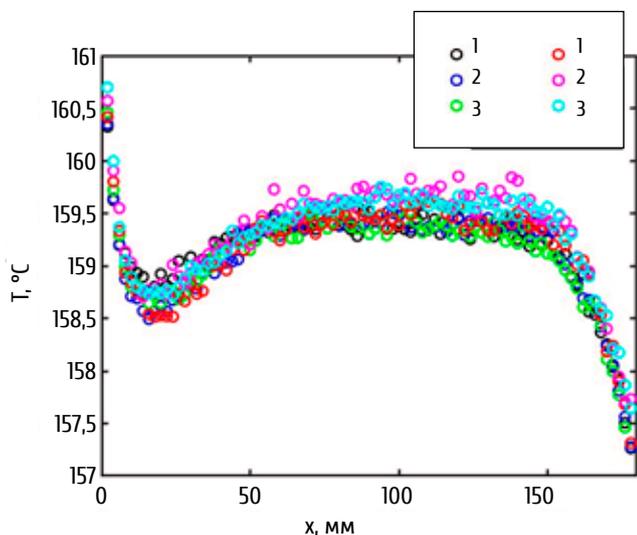


Рис. 2.1.13 – Обобщающий график распределения температуры по поперечному сечению полости

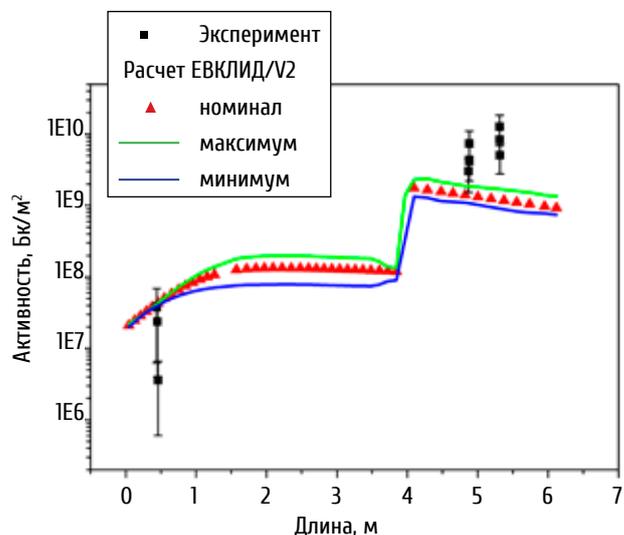


Рис. 2.1.14 – Распределение активности вдоль ПТО

постановке) интегрального кода ЕВКЛИД/V2. Пример расчета распределения температуры при затвердевании теплоносителя представлен на рис. 2.1.16.

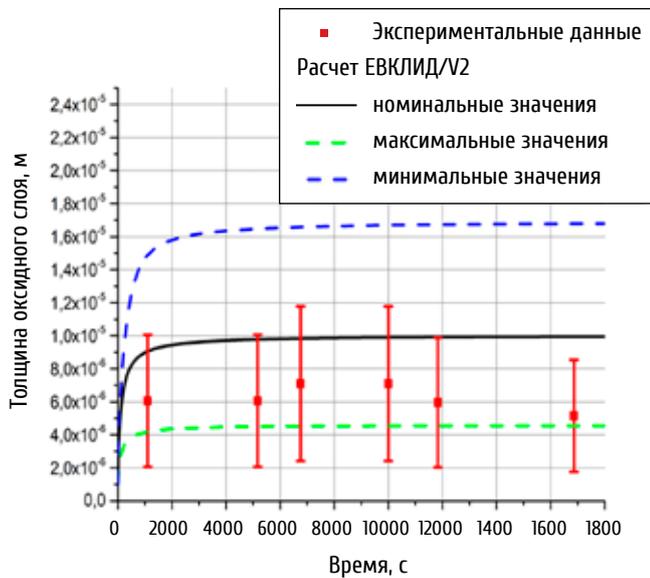


Рис. 2.1.15 — Толщина оксидной пленки в зависимости от времени экспозиции

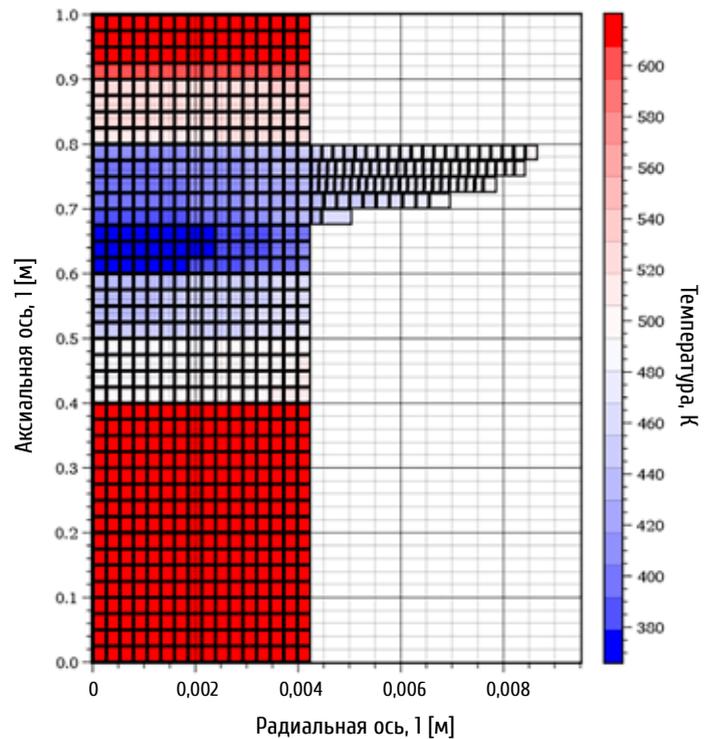


Рис. 2.1.16 — Пример распределения температуры

КЛЮЧЕВЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАБОТ

1. Усов Э. В., Чухно В. И., Климонов И. А., Озрин В. Д., Мосунова Н. А., Стрижов В. Ф.. Модель выхода продуктов деления из бассейна расплава во время тяжелой аварии в реакторе с жидкометаллическим охлаждением // Теплоэнергетика. — 2021. — № 2. — С. 79–85.
2. Усов Э. В., Лобанов П. Д., Прибатурин Н. А. Развитие подходов к анализу движения расплава по поверхности тепловыделяющего элемента // Теплоэнергетика. — 2021. — № 4. — С. 27–34.
3. Usov E. V., Lezhnin S. I., Gafiyatullin A. R. Comparative Analysis of Behavior of Different Fuels during Severe Accident // Journal of Engineering Thermophysics, 2021, vol. 30, no. 2, pp. 235–242.
4. Бутов А. А., Климонов И. А., Кудашов И. Г., Чухно В. И., Сычева Т. В., Усов Э. В., Мосунова Н. А., Стри-

- жов В. Ф. Верификация теплогидравлического модуля интегрального кода ЕВКЛИД/V2 на основе экспериментов, учитывающих распределение параметров по сечению тепловыделяющей сборки // Теплоэнергетика. — 2021. — № 11. — С. 43–51.
5. Прибатурин Н. А., Лобанов П. Д., Рандин В. В., Кашинский О. Н., Курдюмов А. С., Воробьев М. А., Волков С. М. Экспериментальное исследование влияния дистанционирующей решетки на распределение напряжения трения в модели ТВС // Теплофизика и аэромеханика. — 2021. — Т. 28. — № 4. — С. 557–567. — DOI: 10.1134/S0869864321040065.
6. Прибатурин Н. А., Лобанов П. Д., Щепихин И. В., Меледин В. Г., Светоносов А. И. Экспериментальное исследование колебаний стержня в продольном потоке жидкости // Теплофизика и аэромеханика. — 2021. — Т. 28. — № 5. — С. 703–710. — DOI: 10.1134/S0869864321050061.



ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ УПРАВЛЕНИЯ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ



НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ НАПРАВЛЕНИЯ

Заместитель директора

В. Н. Пономарев

д.ф.-м.н.



Заведующий отделом

С. В. Сумароков

(sumarokov@ibrae.ac.ru)

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

ОСНОВНОЙ СПЕЦИАЛИЗАЦИЕЙ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ОТДЕЛА ЯВЛЯЮТСЯ ТЕХНОЛОГИИ УПРАВЛЕНИЯ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ, ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ (PLM-СИСТЕМЫ; PLM – PRODUCT LIFECYCLE MANAGEMENT) И МЕТОДОЛОГИЯ ВНЕДРЕНИЯ ЭТИХ СИСТЕМ НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ. В ОТДЕЛЕ АКТИВНО ВЕДУТСЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ПРИМЕНЕНИЮ РАЗЛИЧНЫХ КОМПОНЕНТОВ PLM-СИСТЕМ И ИХ ИНТЕГРАЦИИ МЕЖДУ СОБОЙ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ЕДИНОГО ИНФОРМАЦИОННОГО ПРОСТРАНСТВА ПРЕДПРИЯТИЯ, В ЧАСТНОСТИ:

- ▶ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ (САПР; CAD – COMPUTER AIDED DESIGN)
- ▶ РАСЧЕТНЫХ КОДОВ (CAE – COMPUTER AIDED ENGINEERING)
- ▶ РАСЧЕТНЫХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ОПТИМИЗАЦИОННЫХ ЗАДАЧ И ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ
- ▶ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ДАННЫМИ ОБ ИЗДЕЛИИ (PDM – PRODUCT DATA MANAGEMENT)
- ▶ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ РАСЧЕТНЫМИ ДАННЫМИ (SPDM – SIMULATION PROCESS AND DATA MANAGEMENT)

ОСНОВНЫЕ ИТОГИ 2021 ГОДА

1. Система «УРАНИЯ»

В рамках ПН «Прорыв» **продолжается разработка системы управления данными и процессами** расчетных и экспериментальных научных исследований «УРАНИЯ», предназначенной для:

- автоматизации управления расчетными и экспериментальными данными (сбор, структурирование, поиск, централизованное и защищенное хранение);
- предоставления унифицированных механизмов для проведения расчетов с использованием различных расчетных систем (в том числе собственной разработки) и вычислительных ресурсов различного уровня;
- автоматизации совместной работы всех участников процессов проведения расчетных и экспериментальных исследований;
- накопления и сохранения научного и инженерного опыта и знаний.

«УРАНИЯ» создается в ИБРАЭ РАН при поддержке ведущих разработчиков РУ на быстрых нейтронах — АО «НИКИЭТ» и АО «ОКБМ Африкантов». В качестве платформы для «УРАНИИ» выступает система CML-Bench, разработанная

Санкт-Петербургским политехническим университетом Петра Великого. В 2021 г. **успешно завершены испытания релиза «УРАНИЯ» 1.0**. Он охватывает автоматизацию проведения расчетных исследований, включая управление расчетными данными, и управление данными об экспериментальных исследованиях.

Также разработан релиз «УРАНИЯ» 2.0, в который добавлены функции управления бизнес-процессами расчетных обоснований, пре/постпроцессинга и визуализации результатов расчетов и интеграции с другими информационными системами ПН «Прорыв».

Применение системы «УРАНИЯ» позволит обеспечить:

- наличие достоверной информации о расчетных характеристиках изделий (факт проведения расчета, исходные данные, расчетные модели, каким расчетным кодом посчитано, каковы настройки расчета, кто считал и т. д.);
- возможность воспроизвести любой ранее проведенный расчет;
- контроль изменений исходных данных (вариантов изделий) и прослеживаемость связи результатов расчетов и исходных данных;

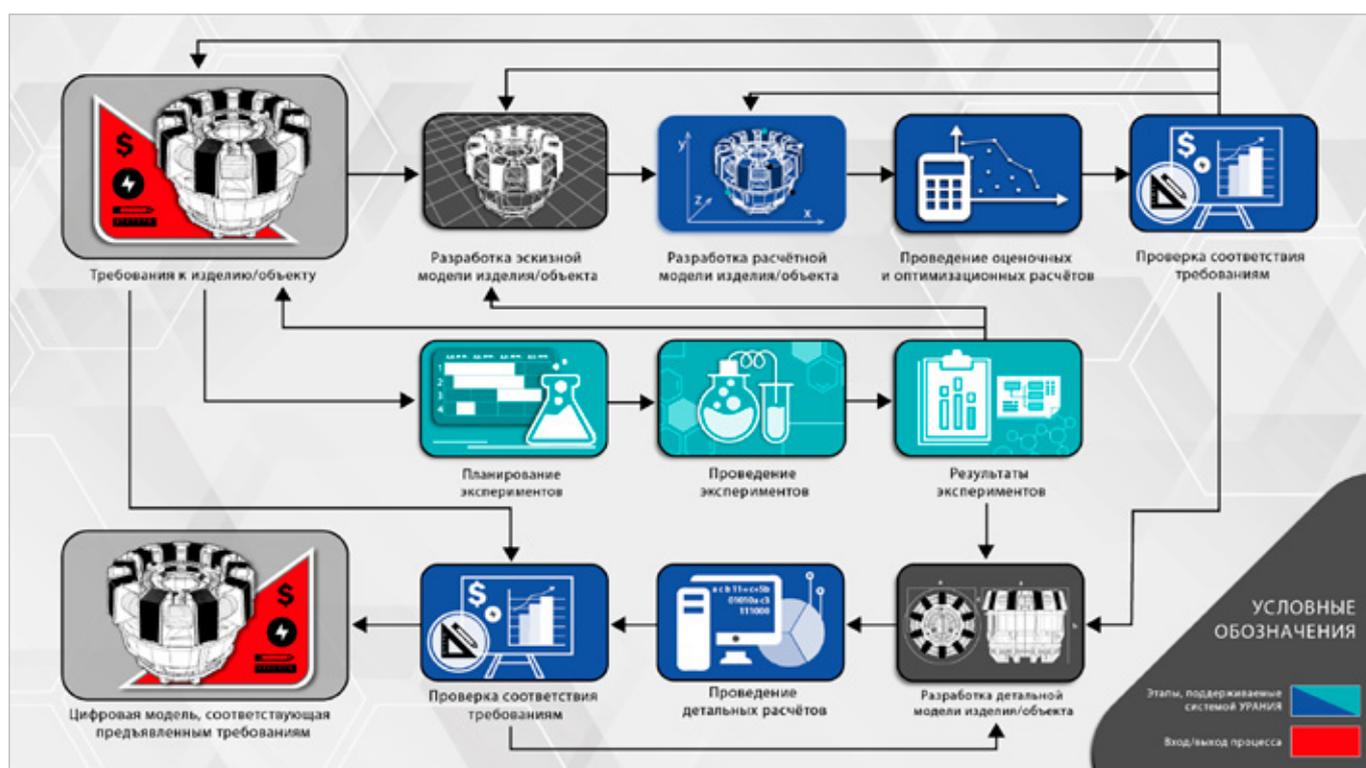


Рис. 2.1.17 – Этапы разработки изделия, на которых применяется система «УРАНИЯ»

- автоматический контроль соблюдения требований к изделию в целом и отдельным его элементам сразу после проведения расчетов;
- информационную интеграцию процессов конструирования и расчетов.

2. Расчетные комплексы для решения оптимизационных задач и параметрических исследований

В рамках ПН «Прорыв» в 2021 г. была продолжена **разработка расчетных комплексов для решения оптимизационных задач и параметрических исследований (РКО)**. Разрабатываемые РКО построены на базе специализированной программной платформы и подключаемых к ней через соответствующие программные интерфейсы расчетных кодов и пре/постпроцессоров. Программная платформа обеспечивает автоматический или автоматизированный поиск оптимальных решений в соответствии с заданной исследователем постановкой.

Разработана **полнофункциональная версия расчетного комплекса для решения оптимизационных задач теплогидравлики (РКО ТГ)**, включающая интерфейсы с расчетными кодами HYDRA-IBRAE/LM/V1, CONV-3D и STAR-CCM+. Проведены предварительные испытания пол-

нофункциональной версии РКО ТГ на базе решения следующих задач:

- **параметрическое исследование характеристик клапана запорного САОР РУ БР-1200.** В рамках исследования рассчитывалось распределение давлений в камерах клапана, а также сил, действующих на золотник, для различных геометрических конфигураций золотника и положения клапана. Полученные данные позволят конструкторам определиться с направлением доработки клапана;
- **оптимизация параметров нодализационной схемы макета ПГ РУ БРЕСТ-ОД-300,** разработанной в коде HYDRA-IBRAE/LM/V1, на основе результатов экспериментов, полученных на стенде СПРУТ;
- **подбор модели турбулентности и параметров сеточной модели клапана САОР** для разных чисел Re применительно к расчетным моделям PK STAR-CCM+. В результате выполненного исследования для четырех режимов течения СТ с различными числами Рейнольдса было определено по одному оптимальному решению. Каждое решение позволило при относительно высокой точности (погрешность $\pm 2\%$ от эталонного значения) получать резуль-

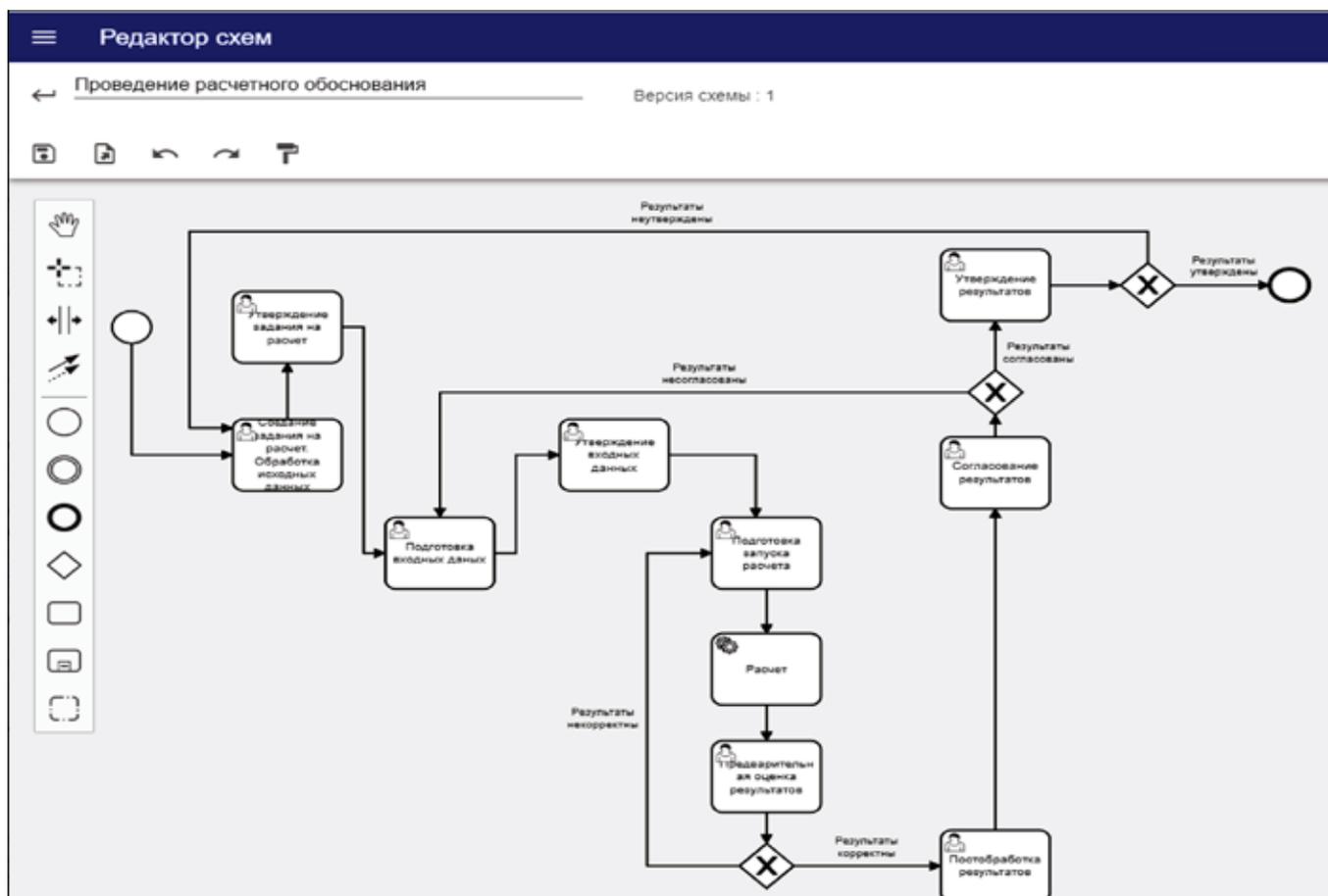


Рис. 2.1.18 – Интерфейс подсистемы управления бизнес-процессами системы «УРАНИЯ»

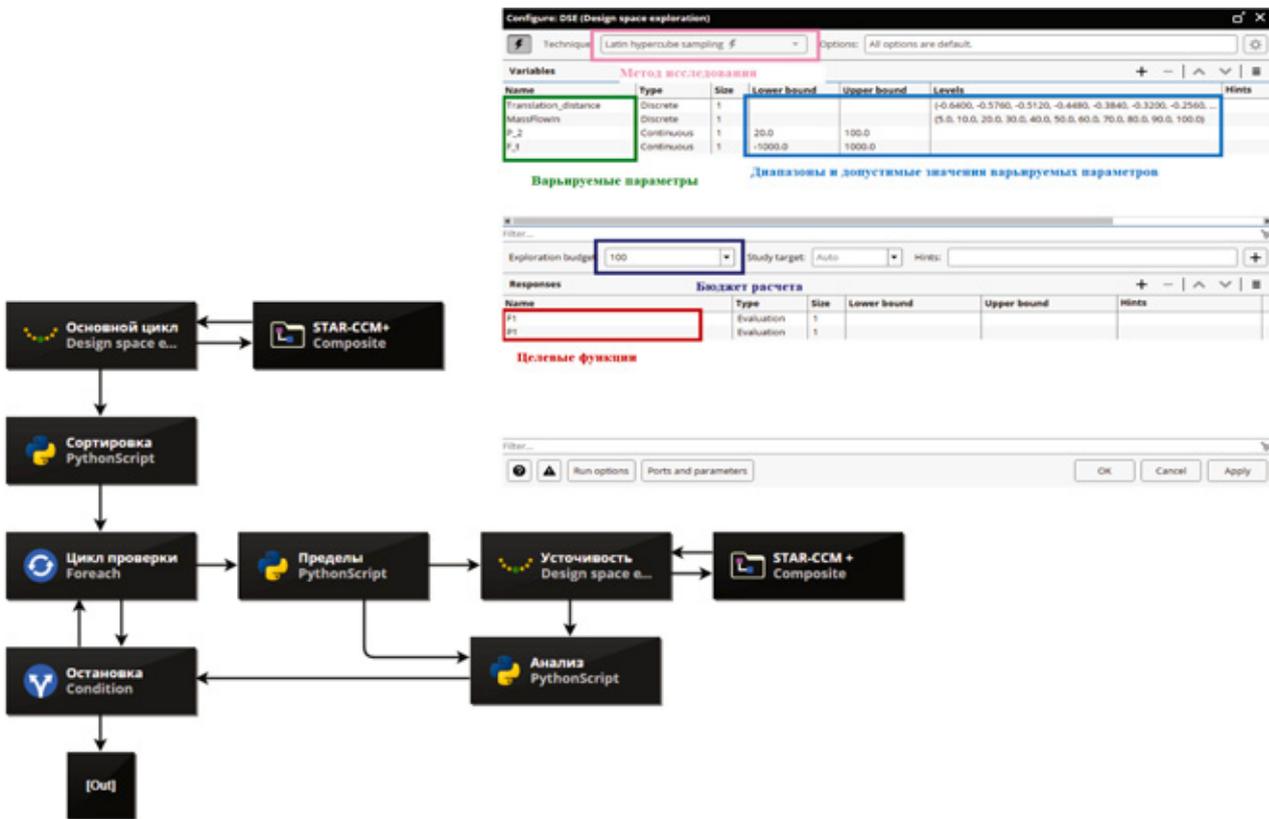


Рис. 2.1.19 – Расчетная схема и интерфейс для задания параметров оптимизационной задачи подбора модели турбулентности и сеточной модели

таты за меньшее машинное время (снижение общего времени решения в среднем на 72% относительно прецизионного расчета).

Проведены испытания макета расчетного комплекса для решения задач оптимизации режимов эксплуатации РУ (РКО РЭ) на базе «Расчетной модели турбоустановки и систем II контура энергоблока с РУ БРЕСТ-ОД-300». Варьируемыми параметрами являлись настройки отдельных регуляторов расчетной модели. Целевой функцией было повышение качества регулирования (способность автоматического регулятора поддерживать с достаточной точностью заданное значение регулируемой величины). Например, удалось повысить качество регулирования ПИД-регулятором уровня в СППВ на 78%, а ПИ-регулятором температуры свинца за ПГ с учетом обратной связи на 16%. На основе результатов апробации макета были даны рекомендации по перенастройке и изменению типа (с ПИ на ПИД) некоторых регуляторов модели второго контура БРЕСТ-ОД-300, что должно привести к повышению качества регулирования в переходных процессах.

Совместно с ОКБМ Африкантов проведены испытания макета расчетного комплекса для решения задач оптимизации нагрузок на трубопроводные системы (РКО ТС), предна-

значенного для поддержки выполняемых в ПК dPIPE 5 расчетов на прочность трубопроводов АЭС при действии эксплуатационных и сейсмических нагрузок. В ходе испытаний на примере решения оптимизационных задач различной степени сложности (например, повышение запаса прочности, снижение максимальных напряжений, снижение стоимости ОПС, снижение нагрузок на опоры) была выполнена проверка основных возможностей макета. В качестве исходных данных использовались модель трубопроводов сдувок от модулей парогенератора в сосуд натриевой буферной реакторной установки типа БН-1200М и модель трубопроводов дренажа реакторной установки типа БН-1200М.

По итогам испытаний макета разработана полнофункциональная версия РКО ТС. Данная версия представляет собой полноценное проблемно ориентированное решение по оптимизации нагрузок на трубопроводные системы. Решение обладает собственными проблемно ориентированным интерфейсом (рис. 2.1.20) и детальной логикой реализации данного класса задач. Кроме того, данная версия РКО впервые была реализована на облачной платформе pSeven Enterprise, позволяющей организовать коллективную работу расчетчиков в масштабе всего предприятия.

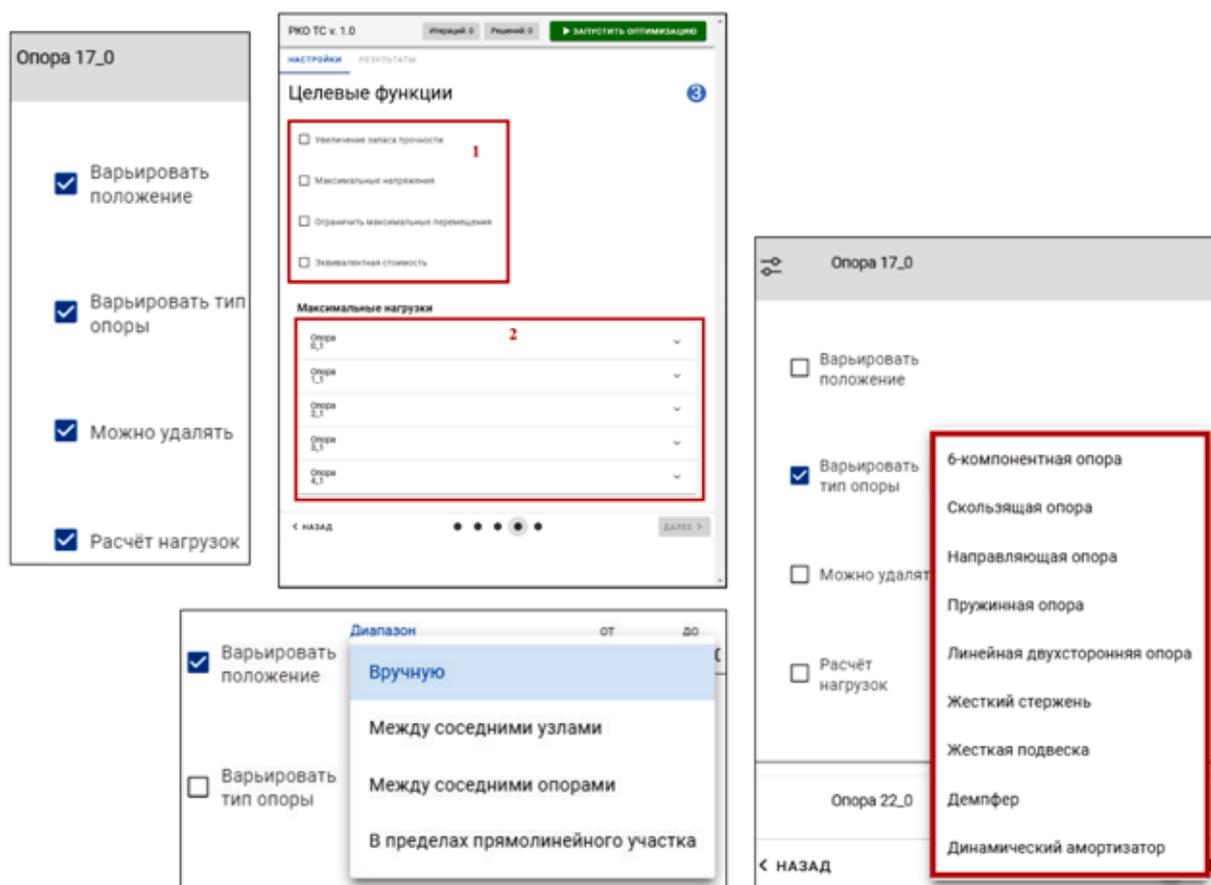


Рис. 2.1.20 – Пример интерфейсов пользователя PKO TC

КЛЮЧЕВЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАБОТ

1. Сумароков С. В., Гусев М. В., Кечков А. А., Новосельский Ф. О., Грошев Т. А., Комиссаров К. В., Белокрылов П. Ю., Повереннов Е. Ю. Визуализация результатов вычислений в онлайн-режиме в системе «УРАНИЯ» // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2021. – № 2. – С. 25–29.
2. Сумароков С. В., Жабоев Т. К., Новосельский Ф. О., Саченко А. С. Разработка макета расчетного комплекса для решения задач оптимизации нагрузок на

трубопроводные системы // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2021. – № 4. – С. 38–45.

3. Долганов А. Е., Гавров К. Е., Сумароков С. В., Новосельский Ф. О. Применение технологий обработки больших данных при моделировании работы оборудования АЭС // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2021. – № 2. – С. 10–14.

2.2. ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОЕКТОВ В СФЕРЕ ЯДЕРНОЙ И РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Исследования и практические работы по направлению обеспечиваются в основном двумя отделениями Института. В ряде случаев к работам привлекаются специалисты иных отделений Института и научных организаций. Рост объемов выполняемых работ, наблюдаемый в последнее десятилетие, реализовался в рекордных объемах заказов в 2021 г. Это произошло главным образом за счет начала работ по федеральному проекту «Разработка технологий управляемого термоядерного синтеза и инновационных плазменных технологий». Набор задач, подлежащих решению в данном проекте (развитие нормативной базы, учитывающей особенности установок, в том числе обращению с РАО и вывода из эксплуатации), оказался наиболее близким к задачам, решаемым в рамках обеспечения безопасности завершающих стадий объектов использования атомной энергии.



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)

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

- 1 СОЗДАНИЕ ЦИФРОВЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ПЛОЩАДОК И ОБЪЕКТОВ ДЛЯ ЗАДАЧ КОМПЛЕКСНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ВЭ И ОБРАЩЕНИЯ С РАО
- 2 РАЗВИТИЕ НОРМАТИВНОЙ БАЗЫ В ОБЛАСТИ БЕЗОПАСНОСТИ НОВЫХ ТИПОВ ЯДЕРНЫХ УСТАНОВОК, ТЕРМОЯДЕРНЫХ И ГИБРИДНЫХ СИСТЕМ
- 3 НОРМАТИВНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ПОДДЕРЖКА ПЛАНИРОВАНИЯ И ВЫПОЛНЕНИЯ МЕРОПРИЯТИЙ В СФЕРЕ ЗСЖЦ
- 4 КОМПЛЕКСНЫЙ МОНИТОРИНГ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ФЦП ЯРБ-2
- 5 ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПУБЛИЧНОСТИ МЕРОПРИЯТИЙ В СФЕРЕ ЯРБ

КЛЮЧЕВЫЕ СПЕЦИАЛИСТЫ

И. Л. Абалкина, к.э.н. — вопросы определения и достижения конечного состояния ОИАЭ и загрязненных территорий, анализ международного опыта (abalkina@ibrae.ac.ru);

В. И. Дорогов, к.ф.-м.н. — экспертиза научной документации, сопровождение подготовки отчетности по «Объединенной конвенции о безопасности обращения с отработавшим топливом и о безопасности обращения с радиоактивными отходами» (vid@ibrae.ac.ru);

В. В. Дроздов — анализ реализации программ в сфере обеспечения ЯРБ (drozdov@ibrae.ac.ru);

Д. Ф. Ильясов, к.э.н — экономический анализ проблем ЗСЖЦ (idf@ibrae.ac.ru);

Е. О. Кузнецова — мониторинг эффективности и обеспечение публичности реализации мероприятий программ в сфере ЯРБ (kuznetsova@ibrae.ac.ru);

О. А. Ильина — разработка и обоснование решений по возврату промышленных площадок ядерного наследия в хозяйственное использование (ilina@ibrae.ac.ru);

Ин. И. Линге — создание комплексной методологии цифровизации в сфере ВЭ и обращения с РАО (iil@ibrae.ac.ru);

Е. М. Мелихова, к.ф.-м.н. — публичность в сфере обеспечения радиационной безопасности населения (e_mel@ibrae.ac.ru);

А. В. Приходько — вопросы лицензирования в сфере ЯРБ (pav@ibrae.ac.ru);

А. А. Самойлов, к.т.н. — комплексное планирование работ по ВЭ и обращению с РАО (samoylov@ibrae.ac.ru);

О. А. Супатаева, к.ю.н. — нормативно-правовое регулирование в сфере ЗСЖЦ (supataeva@mail.ru);

В. Б. Уткин — создание цифровых моделей площадок и объектов (utkin.vb@ibrae.ac.ru);

Алексей А. Федьков — создание IT-инфраструктуры (alexfed@ibrae.ac.ru);

В. В. Шпиньков — развитие нормативной базы в области безопасности новых типов ядерных установок, термоядерных и гибридных систем (shvi@ibrae.ac.ru).

Ключевые молодые специалисты: Мамчиц Е. Г., Овчинников И. Д.

ОСНОВНЫЕ ИТОГИ 2021 ГОДА

1. Создание цифровых информационных моделей (ЦИМ) площадок и объектов для задач комплексного планирования ВЭ и обращения с РАО

В 2021 г. увеличены темпы внедрения современных цифровых информационных технологий в практику планирования и проектирования работ по ВЭ. Существенно расширен спектр рассматриваемых объектов: от удаленных крупных промышленных площадок до площадок, находящихся в густонаселенных районах крупных городов. **Разработаны ЦИМ** (рис. 2.2.1, 2.2.2) для Московского филиала ФГУП «РАДОН» (бывшая площадка АО «ВНИИХТ», г. Москва, Каширское ш., д. 33), радиохимического завода ФГУП «ГХК» (Железногорск, Красноярский край) и АО «Радиевый институт им. В.Г. Хлопина» (Санкт-Петербург).

Построение моделей с использованием наземного лазерного сканирования, имеющейся

проектной и исполнительной документации и данных отчетов КИРО обеспечивает большим объемом данных об элементах строительных конструкций объектов и технологического оборудования, их расположении в пространстве, массогабаритных, радиационных и химических характеристиках. В то же время благодаря опыту ранее выполненных работ был выявлен ряд критических недостатков при оценке радиационного состояния объектов, связанных как с недостаточной детальностью проведения обследований, так и с интерпретацией полученных данных. Это позволило сформировать дополнительные требования к обследованию и проведению натурных измерений и тем самым выйти на более качественный уровень оценки текущего состояния объектов, оценки стоимости работ по ВЭ, разработки рекомендаций по выполнению практических работ по ВЭ и обращению с РАО.

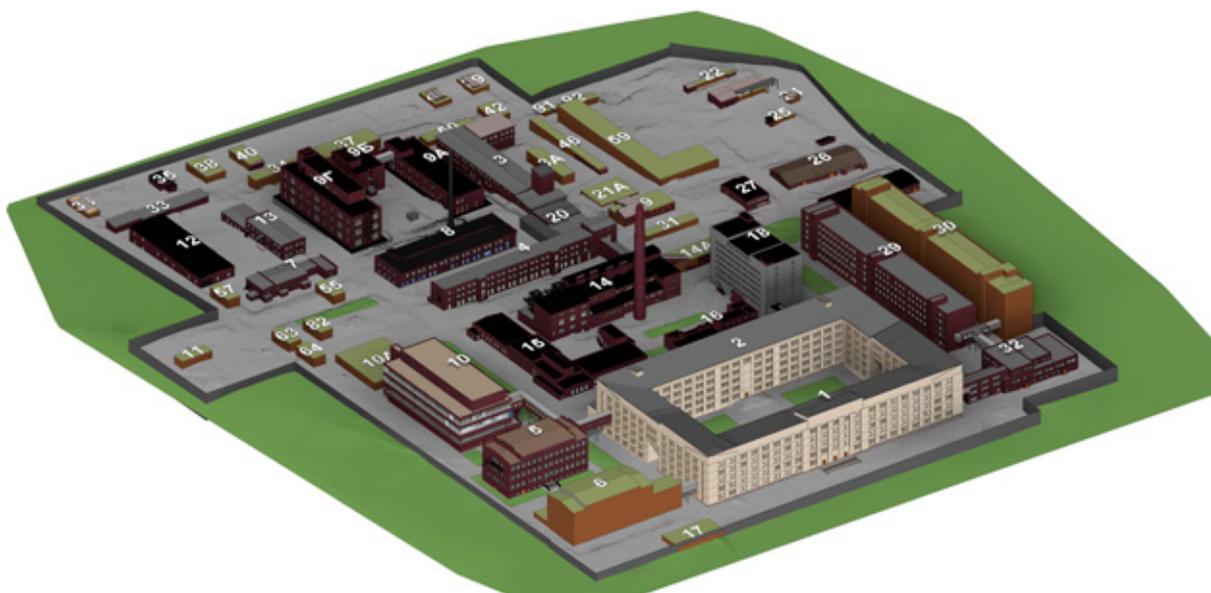


Рис. 2.2.1 – ЦИМ площадки Московского филиала ФГУП «РАДОН»



Рис. 2.2.2 – ЦИМ площадки № 1 АО «Радиевый институт им. В. Г. Хлопина»

Существенно доработаны алгоритмы стоимостных расчетов и расширена функциональность инструмента «Decommissioning Smart Planner» для более детального проведения экономических оценок различных стратегий ВЭ и достижения конечного состояния.

В рамках подготовки исходных данных для создания ЦИМ площадки № 2 АО «Радиевый институт им. В. Г. Хлопина» выполнено уточнение контуров и характеристик радиоактивного загрязнения грунтов с применением методов гамма-каротажа, а также проведен лабораторный анализ проб, отобранных в местах повышенной мощности дозы гамма-излучения. Полученные данные в дальнейшем были использованы при экономических оценках необходимых затрат на реабилитацию территории площадки, а также

при разработке расчетных моделей для обоснования безопасности конечных состояний.

Совместно с сотрудниками Отделения анализа долгосрочных рисков в сфере обеспечения ядерной и радиационной безопасности и Отдела разработки программно-технических средств поддержки аварийной готовности и реагирования **разработан комплекс расчетных моделей для обоснования безопасности конечного состояния рассматриваемых площадок и работ по ВЭ**, учитывающих возможные пути дозового воздействия на персонал и население с учетом различных сценариев (геомиграционная модель (рис. 2.2.3), модель дозового воздействия при водопользовании, модель атмосферного переноса).

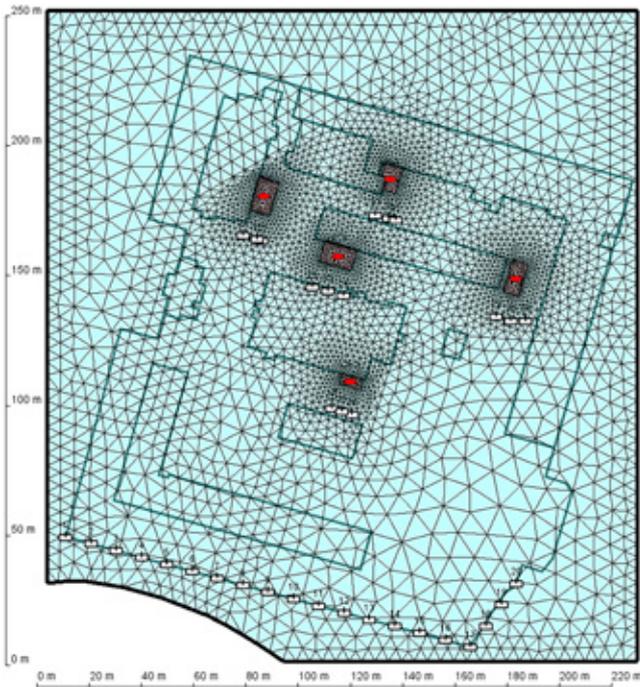


Рис. 2.2.3 — Треугольно-призматическая расчетная сетка модели площадки №1 АО «Радиевый институт им. В.Г. Хлопина»

Проведенные на основе разработанных расчетных моделей оценки долговременной безопасности показали безопасность всех рассмотренных конечных состояний площадки радиохимического завода ФГУП «ГХК», Московского филиала ФГУП «РАДОН» и площадок № 1, 2 АО «Радиевый институт им. В.Г. Хлопина», а также работ по их ВЭ. Созданные ЦИМ и связанные инструменты сетевого планирования позволяют:

- оперативно планировать очередность работ по ВЭ с учетом доступного финансирования и имеющихся ресурсов (персонал, инфраструктура и т. д.);
- осуществлять аппаратный контроль хода демонтажных работ, включая контроль за порядком демонтажа чистого и загрязненного оборудования;
- исследовать возможности повторного использования, редевелопмента площадок и территорий размещения выведенных из эксплуатации объектов.

В будущем эти разработки могут стать основой для создания базы данных по ВЭ и систематизации технологических решений при планировании и проектировании работ.

2. Развитие нормативной базы в области безопасности новых типов ядерных установок, термоядерных и гибридных систем

Начаты работы по развитию **законодательной и нормативной базы в области безопасного использования атомной энергии** в рамках фе-

дерального проекта «Разработка технологий управляемого термоядерного синтеза и инновационных плазменных технологий». Проект направлен на существенное продвижение в решении задачи освоения термоядерной энергии.

Отделение играет ключевую координирующую роль при организации работ в этом направлении, поскольку многоплановость поставленных задач требует централизации компетенций широкого круга специалистов.

Совместно с сотрудниками Отделения разработки программного обеспечения для анализа безопасности АЭС, Отделения анализа безопасности ядерных энергетических установок и коллективами других научных организаций организаций (ФГБУ «НТЦ ЯРБ», ФБун НИИРГ им. П.В. Рамзаева, ФГБУ «НИИ МТ») в 2021 г. обеспечены:

- выполнение **фундаментального анализа основных факторов опасности**, присущих перспективным термоядерным и гибридным системам, анализа экспериментальных прототипов их элементов и систем;
- разработка **Двухэтапной программы исследований** (2022—2024 гг. и 2025—2030 гг.) для определения пределов и условий безопасной эксплуатации новых установок, которая была представлена и одобрена ведущими специалистами в области термоядерных исследований на заседаниях созданной специализированной секции № 2 «Безопасность термоядерных и гибридных систем» НТС № 10 «Экологическая, ядерная и радиационная безопасность» Госкорпорации «Росатом»;
- **анализ детальных характеристик 35 российских и зарубежных программных средств** и определение приоритетных задач по их развитию на период до 2030 г.; начало практических работ по адаптации существующих расчетных средств под нужды моделирования процессов, происходящих в установках управляемого термоядерного синтеза;
- проработка **нескольких вариантов развития законодательной базы** в целях обеспечения создания, проектирования, размещения, сооружения и эксплуатации новых типов ядерных установок, термоядерных и гибридных систем и выбор по согласованию с широким кругом специалистов, приоритетного сценария, для которого определен долгосрочный план работ;
- **практические работы по лицензионному обеспечению** установок, включенных в федеральный проект.

3. Нормативно-методическая поддержка планирования и выполнения мероприятий в сфере ЗСЖЦ

Основной объем работ по направлению выполнялся в области развития **нормативной правовой базы в области обращения с РАО**. В числе ключевых нормативно-правовых актов, по которым велась работа — федеральный закон от 11 июля 2011 г. № 190-ФЗ «Об обращении с радиоактивными отходами...» и постановление Правительства Российской Федерации от 19 октября 2012 г. № 1069 «О критериях отнесения твердых, жидких и газообразных отходов к радиоактивным отходам...». Изменения направлены на повышение эффективности обращения с РАО за счет: актуализации требований к их захоронению, предусмотренных статьей 12; уточнения процедур финансирования захоронения для организаций, не эксплуатирующих особо радиационно опасные и ядерно опасные производства и объекты; учета особенностей образования РАО при выводе из эксплуатации.

Основными объектами обсуждений являлись **изменения критериев отнесения РАО к особым и удаляемым, а также критерии классификации удаляемых РАО**. Так, действующие в настоящее время критерии отнесения РАО к особым необоснованно не позволяют рассматривать отнесение к пунктам размещения особых РАО пунктов хранения РАО, образовавшихся в результате мирного использования атомной энергии. В части критериев классификации удаляемых РАО актуальна прежде всего задача по исключению чрезмерного влияния активности короткоживущих радионуклидов на возможность приповерхностного захоронения РАО. Предложения по внесению изменений в постановление Правительства Российской Федерации от 19 октября 2012 г. № 1069 «О критериях отнесения твердых, жидких и газообразных отходов к радиоактивным отходам...», направленные на решение данных задач, проходят согласование с федеральными органами исполнительной власти.

4. Комплексный мониторинг эффективности реализации ФЦП ЯРБ-2

Продолжено развитие **единой информационно-аналитической системы**, в которой структурированы актуальные сведения о выполнении мероприятий Программы за 2016—2021 гг., отработаны средства подготовки оперативных и регламентированных отчетов. Разработаны и актуализированы паспорта мероприятий ФЦП ЯРБ-2, отражающие основные цели и результаты выполнения работ, исходное состояние и

функционально-технические параметры объектов использования атомной энергии.

Выполнялась **аналитическая и методическая поддержка Госкорпорации «Росатом»** при оценке эффективности и результативности реализации мероприятий Программы за 2021 г., расчете целевых показателей и индикаторов, внесении изменений в Программу с учетом выделяемого финансирования, приоритетности работ, решений по рассмотренным вариантам конечных состояний объектов.

Исследованы возможности повторного использования площадок и территорий размещения выведенных из эксплуатации объектов ядерного наследия с учетом лучших зарубежных практик в области редевелопмента промышленных предприятий, инфраструктурных сооружений и объектов использования атомной энергии. Ликвидация радиационно опасных объектов и развитие на их месте современного городского пространства решают также стратегическую национальную задачу по формированию комфортной и безопасной среды для жизни. Проработаны варианты возможных целевых состояний площадок в результате их перепрофилирования. Разработана и опробована расчетная модель для определения приоритетных вариантов целевого состояния 33 площадок с учетом комплексного показателя потенциальной опасности, ожидаемого коммерческого и социального эффекта от возврата в хозяйственный оборот. Полученные результаты предполагается использовать в том числе для пересмотра очередности ВЭ объектов ядерного наследия и внесением соответствующих изменений в мероприятия ФЦП ЯРБ-2.

Начата разработка специальных условий и инструментов для последующего внедрения новых технологических решений по ВЭ и обращению с РАО, которые поспособствуют повышению эффективности работ в области бэкэнда за счет сокращения затрат на выполнение работ и привлечения частных инвестиций. С участием членов сформированного отраслевого экспертного совета по ВЭ определены основные зоны для инноваций и приоритетные направления для развития в РФ (приборы и установки, информационно-цифровые, расчетно-прогностические, финансово-экономические и организационно-управленческие инструменты). Технологии высокого уровня готовности планируется опробовать на пилотной площадке и в дальнейшем тиражировать на площадках реализации мероприятий Программы.



Рис. 2.2.4 – Тестур на площадке АО «ОДЦ УГР»

5. Обеспечение публичности мероприятий в сфере ЯРБ

Проведено **три технических тура на площадки реализации ФЦП ЯРБ-2**: АО «ОДЦ УГР» (рис. 2.2.4), ФГУП «ПО «Маяк» и территорию г. Медвежьегорска Республики Карелия с участием более 70 представителей общественности, экспертного сообщества и СМИ. Итоги мероприятий и иные материалы о Программе представлены на сайте фцп-ярб2030.рф.

Организован **круглый стол по теме ликвидации объектов ядерного наследия**, в котором приняли участие более **30 экспертов**, в том числе члены Общественного совета Госкорпорации «Росатом», представители предприятий отрасли, экологических, научных и общественных организаций.

Опубликован **первый публичный отчет об итогах реализации ФЦП ЯРБ-2 в 2016—2020 гг.** (рис. 2.2.5), который дает общее представление об основных достигнутых результатах 1-го этапа Программы в области обращения с отработавшим ядерным топливом, радиоактивными отходами и вывода из эксплуатации объектов ядерного наследия.

Продолжилась работа по подготовке и сопровождению **Шестого национального доклада Российской Федерации** по обязательствам, вытекающим из Объединенной конвенции о безопасности обращения с отработавшим топливом и о безопасности обращения с радиоактивными отходами. В результате рассмотрения и анализа докладов зарубежных стран подготовлено и отправлено более **200** вопросов, а также получен **181** вопрос к докладу Российской Федерации. Наиболее пристальный интерес



Рис. 2.2.5 – Сводный информационно-аналитический отчет об итогах 1-го этапа ФЦП ЯРБ-2



Рис. 2.2.6 – Обложка Российского национального доклада «35 лет чернобыльской аварии...»



Рис. 2.2.7 – Пресс-конференция в ТАСС, посвященная презентации Национального доклада Российской Федерации к 35-летию аварии на Чернобыльской АЭС

зарубежных стран вызвали темы захоронения ЖРО в глубокие геологические горизонты («закачка»), обращение с ОЯТ (транспортировка и переработка), вопросы создания ПИЛ. Из-за ограничений, вызванных пандемией, запланированное на июнь 2021 г. совещание по рассмотрению национальных докладов перенесено на год, сформулированы дополнительные требования к докладу.

Российский национальный доклад «35 лет чернобыльской аварии. Итоги и перспективы преодоления ее последствий в России»

Подготовка очередного национального доклада Российской Федерации (рис. 2.2.6) традиционно началась заблаговременно, но в трагических обстоятельствах. В конце 2019 г. ушел из жизни курировавший эту работу заместитель директора **Р. В. Арутюнян**, а осенью 2020 г. уже на активной фазе подготовки доклада вследствие пандемии умер заведующий отделом развития целевых программ комплексной безопасности и защиты населения **А. В. Симонов**. Тем не менее работа продолжалась и была своевременно завершена. Решающий вклад внесла зав. лабораторией проблем коммуникации при оценке риска **Е. М. Мелихова**. В авторский коллектив кроме специалистов ИБРАЭ РАН входили представители МЧС России, Росатома, Рослесхоза, Минобрнауки, Президиума РАН и ведущих научных институтов. В новом докладе авторы предприняли попытку более четкой констатации основных моментов в развитии чрезвычайной ситуации и ключевых управленческих решений, важных для понимания современного положения дел. Впервые в текст доклада были включены уроки аварии для атомной отрасли и общества в целом. **26 апреля 2021 г. ИБРАЭ РАН представил доклад на пресс-конферен-**

ции в ТАСС, разместил его на своем официальном сайте и разослал во все ведущие информагентства страны (рис. 2.2.7).

Организована и проведена **XI Российская научная конференция «Радиационная защита и радиационная безопасность в ядерных технологиях»**, приуроченная к 75-летию атомной отрасли России (рис. 2.2.8). Программный комитет конференции возглавил научный руководитель ИБРАЭ РАН, академик **Л. А. Большов**. В работе конференции приняли участие более **300** специалистов, представляющих Госкорпорацию «Росатом», Министерство науки и высшего образования Российской Федерации,



> **300** СПЕЦИАЛИСТОВ

приняли участие в работе конференции, в том числе

> **10** АКАДЕМИКОВ И ЧЛЕНОВ-КОРРЕСПОНДЕНТОВ РАН

50 ДОКТОРОВ И КАНДИДАТОВ НАУК



Рис. 2.2.8 – XI Российская научная конференция «Радиационная защита и радиационная безопасность в ядерных технологиях»

Ростехнадзор, Роспотребнадзор, Российскую академию наук, ФБУ «НТЦ ЯРБ», в том числе более **10** академиков и членов-корреспондентов РАН, более **50** докторов и кандидатов наук. На тематических секциях конференции было представлено **10** пленарных и **75** секционных докладов, а также **70** докладов с описанием основных результатов вошли в обзор руководителей секций. Основная проблематика так или иначе затрагивала реализацию ФЦП ЯРБ-2.

Организаторами конференции был приложен максимум усилий для того, чтобы в ходе работы конференции в дистанционном формате присутствовали все атрибуты «живого» научного общения и коммуникации.

> **600** ПРОСМОТРОВ
ЗАПИСИ ЗАСЕДАНИЙ



всего:

> **300** ЗАЯВОК НА
УЧАСТИЕ

175 ЗАЯВОК НА
УЧАСТИЕ
С ДОКЛАДАМИ

109 ПРЕЗЕНТАЦИЙ
И ДОКЛАДОВ

130 ТЕЗИСОВ

КЛЮЧЕВЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАБОТ

1. Линге И. И. О радиоэкологических последствиях замыкания ядерного топливного цикла. // Вопросы атомной науки и техники. — Серия: Термоядерный синтез. — 2021. — Вып. 1. — С. 13–17.

2. Линге И. И., Уткин С. С. Радиационные и экологические аспекты атомной энергетики будущего. // Медицинская радиология и радиационная безопасность. — 2021. — Т. 66, № 5. — С. 113–121.

3. Самойлов А. А., Стрижова С. В., Блохин П. А., Александрова Т. А. Актуальные потребности развития санитар-

но-гигиенического нормирования в контексте деятельности по совершенствованию системы обращения с РАО. // Вопросы радиационной безопасности». — 2021. — № 2 (102). — С. 3–13.

4. Дорофеев А. Н., Уткин С. С., Дорогов В. И., Самойлов А. А., Мамчиц Е. Г., Познизов А. В., Василишин А. Л. О развитии структуры представления данных в национальном докладе России в рамках Объединенной конвенции // «Радиоактивные отходы». — 2021. — Вып. 4 (17). — С. 9–19.



НАУЧНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЗАВЕРШАЮЩЕЙ СТАДИИ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ОБЪЕКТОВ ЯДЕРНОЙ ТЕХНИКИ



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

В. С. Гупало, д.т.н. (gupalo@ibrae.ac.ru); **Б. Т. Кочкин**, д.г.-м.н.; **О. А. Морозов**, к.г.-м.н., **В. Г. Тесля**, к.т.н.; **Д. А. Озёрский**, к.т.н. (oda@ibrae.ac.ru); **К. С. Казаков** (kks@ibrae.ac.ru), **Е. В. Муленкова** (mulenkova@ibrae.ac.ru) — геологические и гидрогеологические аспекты безопасности;

И. В. Капырин, к.ф.-м.н. (kapyrin@ibrae.ac.ru); **А. В. Расторгуев**, к.т.н.; **К. А. Болдырев**, к.т.н. (Kaboldyrev@ibrae.ac.ru); **Н. И. Дробышевский** к.ф.-м.н. (dni@ibrae.ac.ru), **Ю. Н. Токарев**, к.т.н. (tyn@ibrae.ac.ru) — геомиграционное и геохимическое моделирование;

А. С. Баринов к.т.н. (barinov@ibrae.ac.ru), **М. В. Ведерникова**, к.т.н. (vmv@ibrae.ac.ru), **С. А. Богатов**, к.ф.-м.н. (sbg@ibrae.ac.ru); **Т. А. Александрова** (aleksandrova_ta@ibrae.ac.ru) — прикладные проблемы безопасности ЗСЖЦ;

Е. А. Савельева, к.ф.-м.н. (esav@ibrae.ac.ru); **В. С. Свительман**, к.ф.-м.н. (svitelman@ibrae.ac.ru) — анализ неопределенностей при решении прикладных задач ЗСЖЦ;

О. О. Епифанова (eoo@ibrae.ac.ru); **Д. В. Крючков**, к.т.н. (dvk@ibrae.ac.ru) — разработка и внедрение информационных систем;

С. В. Панченко (panch@ibrae.ac.ru); **А. Н. Скоробогатов** (sam@ibrae.ac.ru) — проблемы радиэкологии и реабилитации;

П. А. Блохин, к.т.н. (blokhin@ibrae.ac.ru); **А. И. Блохин**, к.ф.-м.н. (bai@ibrae.ac.ru); **Ю. Е. Ванев**, д.т.н. (yuvan@ibrae.ac.ru); **В. П. Крючков**, д.ф.-м.н.; **П. А. Кизуб** (kizub@ibrae.ac.ru) — радиационные характеристики объектов ЯТЦ.

Ключевые молодые специалисты: В. В. Сускин, Г. Д. Неуважаев, Ф. В. Григорьев, М. Ю. Ширнин, Д. В. Ануприенко, К. Д. Смирнов., А. А. Ткачева, С. Т. Казиева, А. А. Аракелян, Р. А. Бутов, Д. А. Соболев

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

- 1 БЕЗОПАСНОСТЬ ГЛУБИННОГО ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ЗАХОРОНЕНИЯ РАО
- 2 РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ РАСЧЕТНО-МЕТОДИЧЕСКОГО ИНСТРУМЕНТАРИЯ ОЦЕНКИ БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТОВ ЯТЦ

Ключевое событие 2021 года:

В сентябре состоялась презентация **ОФИЦИАЛЬНОГО ОТКРЫТИЯ ФИЛИАЛА ИБРАЭ РАН в г. Железнодорожск**. В мероприятии приняли участие: руководство и специалисты Железнодорожского филиала и центрального офиса ФГУП «НО РАО», АО «Концерн ТИТАН-2», ФГУП «ГХК», приемной Общественного совета ГК «Росатом», зам. директора по государственной политике в области ОЯТ, РАО и ВЭ ЯРОО Госкорпорации «Росатом» **А. А. Абрамов**, глава ЗАТО г. Железнодорожск **И. Г. Куксин**.

Решение о необходимости создания филиала было принято в 2019 г., а обособленное подразделение начало функционировать в 2020 г. Летом 2021 г. Минобрнауки России были утверждены соответствующие изменения в уставе Института. **Директором филиала назначен к.т.н. Д. А. Озёрский**.

К числу **основных задач филиала** относятся инфраструктурное и научное обеспечение реализации программы исследований подземной лаборатории, создаваемой ФГУП «НО РАО», а также информационная и технологическая поддержка работ ИБРАЭ РАН по ВЭ ЯРОО ФГУП «ГХК».



И. И. Линге, заместитель директора по научной работе и координации перспективных разработок ИБРАЭ РАН, дает интервью красноярским СМИ.



Д. А. Озёрский, директор Красноярского филиала ИБРАЭ РАН (г. Железнодорожск), проводит работы на разведочной скважине



А. А. Абрамов, заместитель директора по государственной политике в области РАО, ОЯТ и ВЭ ЯРОО Госкорпорации «Росатом», на открытии Красноярского филиала

ОСНОВНЫЕ ИТОГИ 2021 ГОДА

1. Обоснование безопасности глубинного захоронения РАО

Создание подземной исследовательской лаборатории

Продолжены **активные работы по доизучению площадки сооружения подземной исследовательской лаборатории** и зоны потенциального влияния ПГЗРО. Силами специалистов ИБРАЗ РАН, включая сотрудников Красноярского филиала, и соисполнителей (ИГЕМ РАН, СПбО ИГЭ РАН, Геофизический центр РАН, ИФЗ РАН, АО «Красноярскгеология» и др.) продолжено проведение полевых работ. В 2021 г. на площадке:

- Выполнена **обработка результатов наблюдения за движениями блоков земной коры**, показавшая, что наибольшие скорости приурочены к имеющимся в районе площадки ПИЛ/ПГЗРО Муратовскому, Атамановскому, а также Правобережному и Большетельскому разломам (рис. 2.2.9). Данные результаты были использованы при создании карт детального геодинамического районирования участка «Енисейский».
- Проведена **обработка данных сейсмического мониторинга**. Выделены источники далеких, региональных и местных (локальных) сейсмических событий, идентифицированы сигналы от карьерных взрывов и получе-

ны оценки параметров микросейсмического фона (рис. 2.2.9). За период с 01.01.2021 г. по 31.12.2021 г. обнаружено и идентифицировано 508 сигналов от местных событий, в том числе 499 сигналов от взрывных событий, при этом отсутствовали сейсмические сигналы, источники которых были бы расположены в радиусе до 30 км от площадки ПГЗРО.

- Выполнена **обработка результатов водобалансовых наблюдений**, определена величина инфильтрационного питания (модуля стока) — составляющей водного баланса, которая восполняет запасы подземных вод и является одним из ключевых параметров, необходимых для использования в расчетных гидрогеологических моделях и контролирующей долговременную безопасность ПГЗРО, поскольку от интенсивности подземного стока прямым образом зависит объем воды, который будет фильтроваться через тело пункта окончательно изоляции РАО. По результатам обработки данных определено, что максимальный модуль подземного стока (3,29 л/с/км²) имеет часть водосбора, в которую попадает строительная площадка ПГЗРО. Чуть меньший модуль подземного стока (2,99 л/с/км²) имеет водораздельная территория. Минимальный модуль стока (2,34 л/с/км²) приурочен к части водораздела, характеризующейся средниминимальными отметками рельефа.



Рис. 2.2.9 — Спутниковые измерения на пунктах геодезической сети геодинамического полигона



Рис. 2.2.10 – Отработка технологии скважинных нагнетаний и построения напорного профиля скважин в 10-метровых интервалах



Рис. 2.2.11 – Рекогносцировочные геологические обследования – замеры положения элементов неоднородностей массива на породных обнажениях, отбор образцов горных пород

- Продолжена отработка методов и оборудования для **изучения гидрогеологических характеристик скальных слабопроницаемых пород**, в том числе и отнесенных к категории «непроницаемые», а также для оценки проницаемости отдельных интервалов скважины (рис. 2.2.10).
- По результатам полевых работ, проведенных в районе строительства ПИЛ, рекогносцировочных геологических обследований, отбора и анализа образцов горных пород **уточнены геологические карты участка и района размещения ПИЛ**, подготовлены версии карт блокового строения и карт геодинамического районирования (рис. 2.2.11). Данные результаты будут использованы как исходные данные для проведения последующего геологического доизучения района строительства ПИЛ.

Продолжается развитие информационно-аналитической платформы научного сопровождения **ПИЛ — PULSE** (Project of Underground Laboratory Scientific Escort) (рис. 2.2.12).

Основными целями PULSE как инструмента управления информацией и знаниями в рамках Стратегии создания ПГЗРО и Комплексной программы исследований являются:

- синхронизация информации между всеми вовлеченными исследовательскими организациями;
- оптимизация управления исследованиями;

- обеспечение прослеживаемости аргументов для обоснования долговременной безопасности.

PULSE включает инструменты документирования, визуализации, использования всего многообразия информации, входящей в обоснование долговременной безопасности: нормативных и технических требований, результатов численных, лабораторных и полевых исследований, выводов экспертизы, истории принятия решений.

Ключевая часть наполнения PULSE — это установление взаимосвязей между различными блоками информации при помощи метаданных и гиперссылок. Такой подход нацелен на переход от электронного информационного архива к интерактивному обоснованию долговременной безопасности и цифровому двойнику ПИЛ. На рис. 2.2.13 многообразие взаимосвязей в процессе обоснования долговременной безопасности проиллюстрировано на примере проработки экспериментов в ПИЛ.

Работы в рамках сбалансированного ЯТЦ

Прорабатывается вопрос **возможности захоронения короткоживущей цезий-стронциевой фракции (ВАО)** с целью определения предварительных требований к переработке ОЯТ. Для этого были проведены расчеты тепловых режимов различных конфигураций ПЗРО, а также гидрогеологическое моделирование процессов выхода радионуклидов из ПЗРО при раз-

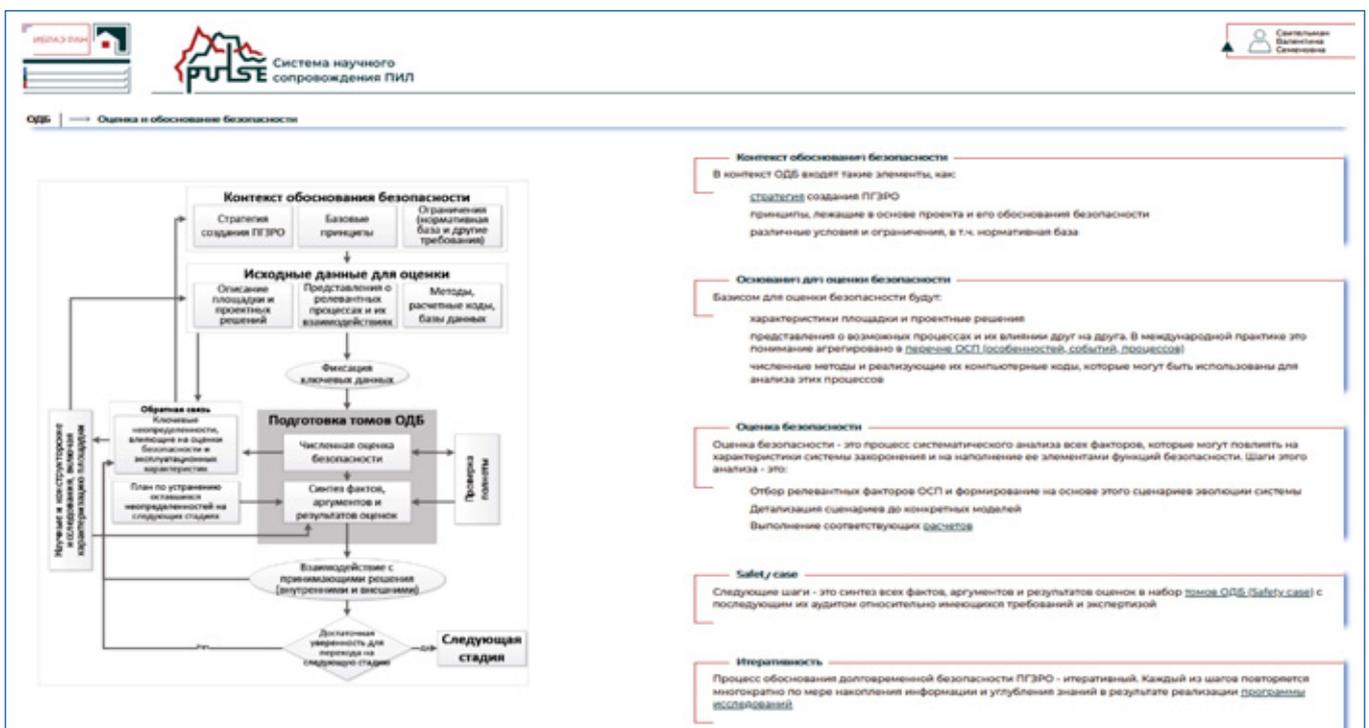


Рис. 2.2.12 – Интерфейс системы PULSE

личных вариантах граничных условий и типов вмещающей породы. Полученные результаты продемонстрировали возможность захоронения КФ ВАО в ПЗРО на глубине до 100 м (рис. 2.2.14, 2.2.15).

2. Разработка и применение расчетно-методического инструментария оценки безопасности объектов ЯТЦ

В части решения задач обоснования безопасности завершающих стадий жизненного цикла разрабатываются следующие российские коды (расчетно-прогностические комплексы — РПК):

- **FENIA** (3D конечноэлементная программа для расчетов теплового режима, напряженно-деформированного состояния и прочности объектов, в том числе находящихся внутри вмещающей среды).
- **RELTRAN** (программный комплекс для задач обоснования безопасности ОЯН в случае атмосферных радиоактивных выбросов при нормальной эксплуатации и в аварийных условиях).
- **GeRa** (программный комплекс трехмерного гидрогеологического моделирования для эффективного решения задач геофильтрации и геомиграции загрязнений в подземных водах).
- **КОРИДА** (интегральный расчет нейтронно-физических характеристик реакторных установок и доз облучения для населения и персонала

для принятия управленческих и стратегических решений).

- **MOUSE** (расчетный комплекс для учета неопределенностей в процессе численного моделирования для задач обоснования безопасности).

Они позволяют **решать весь комплекс релевантных практических задач без применения иностранных аналогов**. В частности:

- В рамках обоснования безопасности или оптимизации технических решений по ВЭ созданы и усовершенствованы модели объектов ФГУП «РАДОН», ФГУП «НО РАО», АО «СХК», ФГУП «ПО «Маяк», АО «ЧМЗ», Белоярская АЭС, АО «АЭХК», ФГУП «ГХК».
- Продолжено развитие технологий по цифровому и численному моделированию «типового» ПЗРО. В рамках работы проведены многовариантные расчеты тепловых режимов ПЗРО при загрузке РАО и определены критические значения удельного энерговыделения упаковок РАО с учетом неопределенностей.
- С применением РПК выполнены предварительные оценки радиационной безопасности работ, связанных с выемкой радиоактивно загрязненного грунта на участке радиационного загрязнения на месте сооружения Юго-Восточной хорды в Москве.
- В рамках развития РПК решались и принципиально новые задачи — цифровизация всех

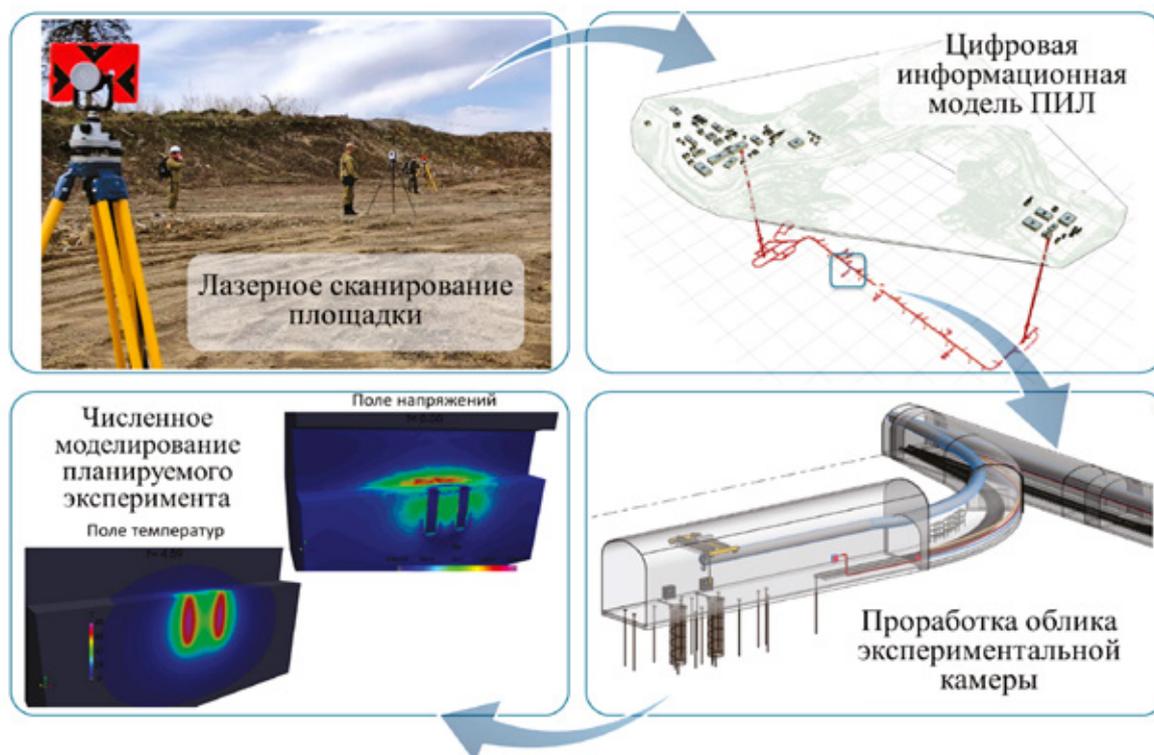


Рис. 2.2.13 — Разработка цифровой модели ПИЛ: модель конструкций ПИЛ (слева), использование лазерного сканирования для формирования рельефа (справа)

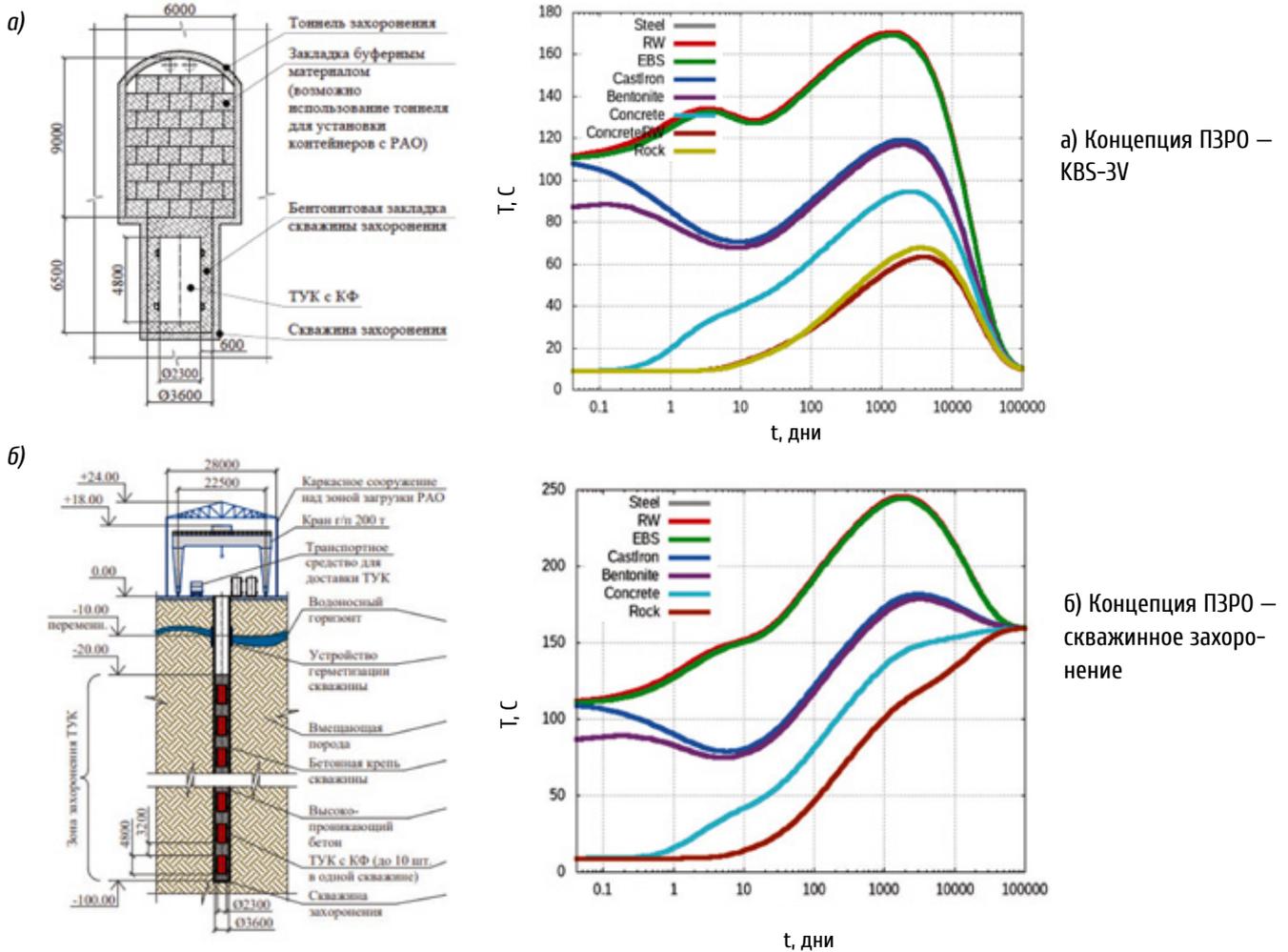


Рис. 2.2.14 – Оценки теплового состояния ПЗРО при различных компоновках ТУК с КФ ВАО

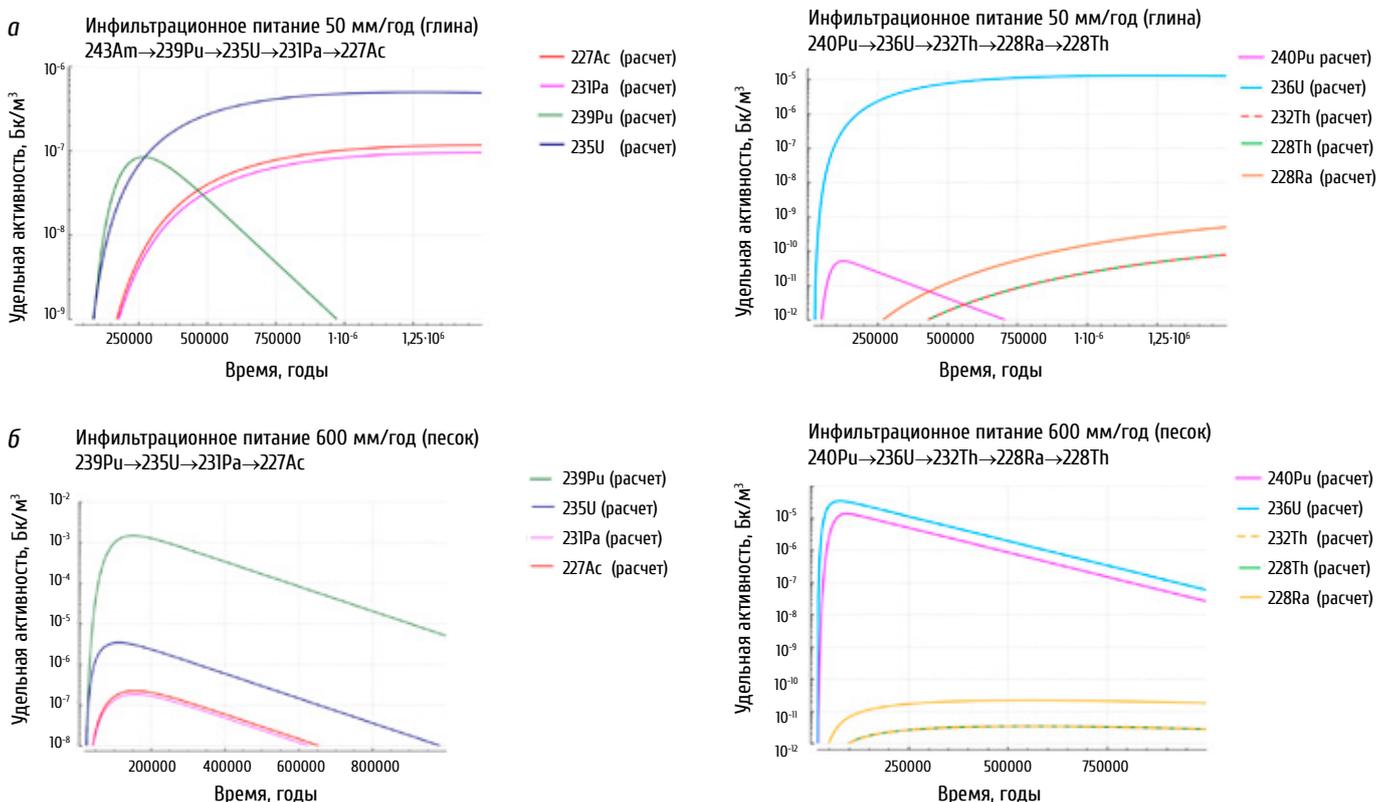


Рис. 2.2.15 – Оценки ограничения содержания радионуклидов в КФ ВАО: а – ограничение на содержание р/н для ПЗРО, расположенного в глиняных формациях, б – ограничение на содержание р/н для ПЗРО, расположенного в песчаной породе

стадий обоснования безопасности и создание современных информационных инструментов для прикладных задач ЗСЖЦ.

- Созданы базы данных для поддержки решений в разрезе актуальных задач ЗСЖЦ по широкому перечню объектов ФЦП ЯРБ-2, обеспечена их совместимость с расчетными кодами GeRa (гидрогеология), КОРИДА (нейтронная физика и перенос излучений), FENIA (термомеханика).
- Внесена информация о нескольких десятках моделей, направленных на решение задач по изменению теплового режима, напряженно-деформированного состояния от воздействия теплового расширения, оценке радионуклидных составов и радиационных характеристик типовых объектов и конструктивных элементов, миграции радионуклидов за пределы объектов.
- Поданы на аттестацию РПК FENIA/V.1 и КОРИДА/V.1, продолжены работы по сопровождению экспертизы GeRa/V.2, проведены школы-семинары по демонстрации возможностей кодов для специалистов из организаций атомной отрасли (75 человек из 22 организаций).

- Активно развивались средства для проведения взаимосвязанных расчетов по различным расчетным кодам для анализа чувствительности и неопределенностей (КОРИДА-MOUSE, GeRa-MOUSE и FENIA-MOUSE). Одно из перспективных направлений — расчетные исследования, направленные на определения требований к проведению КИРО для обеспечения вывода из эксплуатации объектов ядерного наследия.
- Разработано 10 РИД (программ для ЭВМ), а результаты разработок и применения программ опубликованы в 10 статьях и 15 докладах на конференциях. Также получены акты внедрения результатов расчетов от АО «ГНЦ НИИАР», АО «СХК», химического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.
- Результаты расчетов анализа чувствительности с применением программы MOUSE были отражены в отчете «Sensitivity Analysis Comparisons on Geologic Case Studies: An International Collaboration» международной коллаборации по методам анализа чувствительности для задач обоснования долговременной безопасности ПГЗРО.

КЛЮЧЕВЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАБОТ

1. Панченко С.В., Ведерникова М.В., Линге И.И., Мелихова Е.М., Уткин С.С. и др. Радиоэкологическая обстановка в регионах расположения предприятий Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» / под общ. ред. И.И. Линге и И.И. Крышева. — Изд. 2-е, испр. и доп. М., 2021. — 555 с.

2. Saveleva E., Svitelman V., Blinov P., Valetov D. Sensitivity analysis and model calibration as a part of the model development process in radioactive waste disposal safety assessment // *Reliability Engineering & System Safety*. 2021.

3. Богатов С. А., Блохин П. А., Уткин С. С., Дорофеев А. Н. и др. Усредненные оценки удельной активности и тепловыделения остеклованных высокоактивных отходов, накопленных на ФГУП «ПО «Маяк» // *Вопросы радиационной безопасности*. — 2021. — № 3 (103). — С. 3–12.

4. Кочкин Б.Т., Савельева Е. А., Богатов С. А. Эволюция ПГЗРО в Нижнеканском массиве под воздействием климатических факторов // *Радиоактивные отходы*. — 2021. — № 2(15). — С. 63–75.

5. В.С. Гупало, К.С. Казаков. Результаты исследований в существующих скважинах на участке недр «Енисейский», в т. ч. для определения основных систем трещин

и анизотропии массива пород // *Радиоактивные отходы*. — 2021. — № 2(15). — С. 76–86.

6. Алой А. С., Ковалев Н. В., Прокошин А. М. и др. Исследование радиационной устойчивости боросиликатного стекла к бета-и гамма-излучению с помощью ускоренных протонов // *Радиоактивные отходы*. — 2021. — № 2(15). — С. 8–18.

7. Крышев И.И., Сазыкина Т. Г., Аракелян А. А., Ведерникова М. В., Панченко С. В. Вопросы установления нормативов радиационной безопасности объектов живой природы, в том числе при обращении с РАО // *Радиоактивные отходы*. — 2021. — № 2(15). — С. 99–105.

8. Савельева Е. А., Свительман В. С., Блинов П. Д., Валетов Д.К., Горелов М. М. О выборе метода оценки чувствительности модели к ее параметрам при обосновании безопасности пунктов захоронения РАО // *Радиоактивные отходы*. — 2021. — № 2(15). — С. 73–89.

9. Неуважаев Г. Д., Расторгуев А. В., Смирнов К. Д. Интерпретация опытно-фильтрационных работ из несовершенных скважин в слабопроницаемом скальном массиве с учетом потока в стволе совершенной наблюдательной скважины на примере участка «Енисейский» // *Радиоактивные отходы*. — 2021. — № 4(17). — С. 61–71.



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 (vvl@ibrae.ac.ru);

М. Н. Кобринский, к.ф.-м.н. — долгосрочное планирование в сфере ядерной и радиационной безопасности, информационные системы управления (mnk@ibrae.ac.ru);

Г. Э. Ильющенко, к.т.н. — планирование и реализация мероприятий по повышению радиационной безопасности объектов РАН (ige@ibrae.ac.ru);

В. А. Сотников, к.т.н. — разработка математических моделей процессов деградации защитных барьеров и их влияния на радиационную безопасность (vasotnikov@ibrae.ac.ru).

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ в 2021 году

- 1** ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
- 2** ДОЛГОСРОЧНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ И РЕАЛИЗАЦИЯ МЕРОПРИЯТИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ОРГАНИЗАЦИЙ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
- 3** РЕКОНСТРУКЦИЯ И ОЦЕНКА ПОСЛЕДСТВИЙ ЯДЕРНОЙ АВАРИИ НА АПЛ В БУХТЕ ЧАЖМА

ОСНОВНЫЕ ИТОГИ 2021 ГОДА

1. Исследование радиозоологических проблем Арктической зоны Российской Федерации

Оценка величин максимальных выбросов радионуклидов в случаях гипотетических аварий на представительных объектах с ЯЭУ в Арктическом регионе

В 2021 г. продолжались работы в рамках гранта РФФИ № 20-19-00615 от 25.05.2020 г. «Исследование радиозоологических проблем Арктической зоны Российской Федерации с целью повышения радиационной и экологической безопасности человека и окружающей среды в условиях интенсивного использования морских и береговых ядерных энергетических установок для опережающего развития региона».

Планируемое интенсивное развитие использования ядерной энергии в Арктике означает рост количества ядерных энергетических установок (ЯЭУ) в этом регионе. Учитывая число имеющихся сегодня ядерных объектов, а также строящихся, проектируемых и планируемых к созданию в будущем объектов, логично предположить, что наибольшее сосредоточение их можно ожидать в двух приграничных регионах — г. Мурманске (ФГУП «Атомфлот»), где базируются атомные ледоколы, и Чукотском автономном округе, где расположены первая в мире ПАТЭС «Академик Ломоносов» и Билибинская АЭС.

Сегодня на ледоколах используются следующие ЯЭУ: АБВ-6Э, КЛТ-40С, РИТМ-200М. В перспективе добавятся РИТМ-40 и др. На ПАТЭС

установлены две реакторные установки (РУ) КЛТ-40С. В ближайшем будущем планируется создание еще ряда ядерных энергетических объектов с установками РИТМ-200М и др.

Для оценки величины максимального радиоактивного выброса при гипотетической ядерной аварии на таких объектах в Арктике был использован метод пересчета выхода характерных нуклидов за пределы защитных барьеров при известных авариях (ЧАЭС, АЭС «Фукусима-1», авария в б. Чажма и др.) с учетом тепловой мощности и суммарной энерговыработки конкретных реакторов. Было принято во внимание то, что при аварии значительная часть отработавшего топлива (ОЯТ) остается в корпусе реактора. За пределами реакторной установки оказываются, как правило, радиоактивные благородные газы (РБГ), йод, цезий. В активной зоне транспортного реактора после полной выработки энергоресурса суммарное накопление активности определяется в основном продуктами деления ^{90}Sr , $^{134,137}\text{Cs}$ и оценивается примерно в 10 ПБк.

Для определения радиологической опасности последствий аварии используется индивидуальный коэффициент радиологической значимости изотопа. В качестве эталонного изотопа принят ^{131}I с коэффициентом 1. Реперными радионуклидами, испускающими все виды излучений (альфа, бета, гамма), а также представляющими наибольшую опасность для человека и окружающей природной среды (ОПС), принято считать следующие изотопы с соответствующими значениями коэффициентов радиологиче-

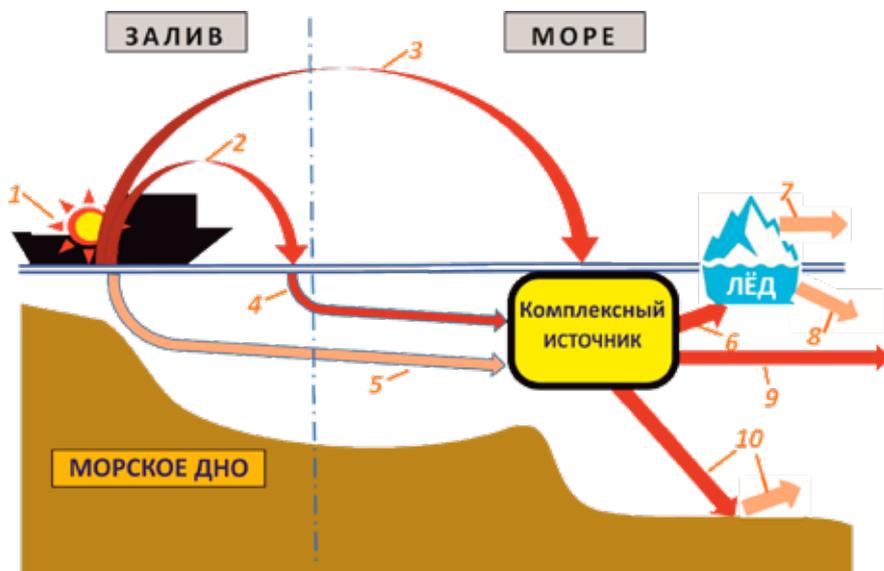


Рис. 2.2.16 — Схема формирования комплексного источника при аварии ЯЭУ в заливе и последующего переноса радионуклидов от сформированного источника.

(1) — авария на ЯЭУ в заливе с выбросом радионуклидов в атмосферу; (2) — выброс в атмосферу и осаднение радионуклидов на поверхность залива; (3) — выброс в атмосферу и осаднение радионуклидов на морскую поверхность; (4) — распространение в толще воды осевших в залив радионуклидов и вынос их в море; (5) — выброс радионуклидов в воду залива и вынос их в море; (6) — вмерзание радионуклидов в лед из воды; (7) — перенос радионуклидов льдом; (8) — вытаивание радионуклидов и их дальнейшее распространение в воде; (9) — распространение радионуклидов в толще воды; (10) — оседание радионуклидов на дно, захват и вымывание части из них

ской значимости: ^{131}I (1), ^{134}Cs (3), ^{90}Sr (20), ^{137}Cs (40), ^{60}Co (50), ^{241}Am (8000), $^{239,240}\text{Pu}$ (10000), а в качестве представителя группы РБГ — ^{133}Xe .

Наибольшую радиационную опасность представляют актиноиды с альфа-излучением. Среднюю степень опасности представляют долгоживущие продукты деления ^{90}Sr и ^{137}Cs . Относительно небольшую опасность имеют бета-излучатели: ^{60}Co , ^{55}Fe , ^{63}Ni и др.

Обобщая данные по накоплению радионуклидов в аварийных реакторах, рассматриваемых в проекте, получаем следующие значения максимального накопления радионуклидов для оценки радиологических и радиоэкологических последствий гипотетических аварий плавучих и береговых ЯЭУ (в ПБк): ^{131}I (5,4), ^{90}Sr (12), ^{134}Cs (14,6), ^{137}Cs (12), $^{239,240}\text{Pu}$ (0,2), ^{241}Am (0,02), ^{60}Co (1,6). Видно, что наибольшее накопление активности на уровне 0,1—10 ПБк дают ^{90}Sr , $^{134,137}\text{Cs}$. Примерно в два раза меньшую активность дает содержащийся в топливе ^{131}I , в 8 раз — ^{60}Co и в десятки раз — остальные радионуклиды.

Сопоставление выбросов, произошедших в результате аварий на ЧАЭС и АЭС «Фукусима-1», с приведенными максимально возможными выбросами из транспортных реакторов тепловой мощностью 200—300 МВт показывает, что последствия воздействия последних на ОПС будут в десятки-сотни раз меньше. Однако в результате настоящих исследований, включающих моделирование распространения радионуклидов в водах Арктики, показано, что этой активности достаточно для радиоактивного загрязнения обширных территорий и морских акваторий в радиусе до 1000 км от места аварии с уровнем, хотя и незначительно превышающим естественный фон, но достаточным для того, чтобы вызвать громкий общественный резонанс, негативные заявления политиков и волну спекуляций в прессе. Понимая все это, надо быть готовыми к разъяснению реальной ситуации с использованием, в том числе полученных результатов моделирования распространения радионуклидов в акватории Арктики.

Усовершенствование математической модели переноса радионуклидов в океанической среде и алгоритмов для проведения численных расчетов

Моделирование переноса радионуклидов в океанической среде осуществлялось совместно с сотрудниками ИВМ РАН, при этом использовалась математическая модель ИВМИО. Однако для моделирования загрязнения океана в условиях поступления радионуклидов от сложного

комбинированного источника, включающего:

- точечный источник непосредственного поступления загрязнения от аварийного объекта;
 - распределенный во времени и пространстве поверхностный источник от осаждения радионуклидов из атмосферы на поверхность воды или льда с последующим таянием льда;
 - распределенный во времени и пространстве объемный источник от выноса радионуклидов из заливов/проливов в открытое море,
- требовалось усовершенствование данной модели.

Для этого весь процесс распространения радионуклидов после аварийного выброса для удобства описания был условно разбит на две стадии. Первая стадия — формирование источника. Это выброс радионуклидов в атмосферу, воздушный перенос их и осаждение на подстилающую поверхность — воду залива, акваторию открытого моря, сушу. Далее — распространение осевших на водную поверхность частиц в толще воды: в заливе с выносом в открытое море или непосредственно в открытом море. В результате этих перемещений радионуклидов (выброс, перенос по воздуху, выпадение на подстилающую поверхность залива и открытого моря, перенос в воде залива с выносом в открытое море) в море сформируется пространственно распределенный и изменяющийся во времени «комплексный источник» загрязнения, который и станет исходной конфигурацией для дальнейшего распространения радионуклидов в акватории Арктики и моделирования этого процесса. Это — вторая стадия процесса распространения.

Кроме атмосферного переноса с последующим оседанием на поверхность воды существует еще вариант прямого выброса радиоактивных веществ в воду (без атмосферного переноса). Схематически эти процессы в их последовательности изображены в левой части рис. 2.2.16 и дают наглядную картину первой стадии — формирования «комплексного источника» — для последующего моделирования океанического распространения загрязнения. Правая часть рисунка иллюстрирует стадию 2 — совокупность процессов, определяющих картину океанского переноса. Различные цвета стрелок на рис. 2.2.16 означают разную степень проработки (готовности) индивидуальных моделей для описания различных механизмов переноса: более насыщенный цвет стрелок означает большую степень проработанности модели для данного процесса.

Поскольку задача о распространении загрязнений в общем случае является неопределенной относительно источника и его характеристик, то будем считать, что источников может быть несколько. Каждый из них способен поставлять в модель распределенные как во времени, так и в пространстве частицы с заданными характеристиками (в случае радиоактивного загрязнения это радионуклиды и их продукты распада).

Вычисления в реализации процесса моделирования разбиты на два этапа: инициализация и расчет динамики.

В процессе инициализации выполняется чтение начальных параметров каждой группы частиц, участвующих в дальнейшем моделировании, а также осуществляется загрузка начальных координат, состояния частиц в начальный момент времени, либо доступных на момент времени сохраненной контрольной точки модели. В этот момент времени также выполняется конвертация географических координат в логические координаты частицы методами перспективной проекции.

При моделировании глобальной циркуляции океана для увеличения точности расчетов, как правило, используется сетка, заданная над сферическими или биполярными координатами. В этом случае процедуры интерполяции поля скорости внутри вычислительной ячейки оказались бы слишком затратными. Поэтому расчеты Лагранжева переноса производятся в логических координатах, то есть в прямоугольных декартовых координатах над ячейками с единичной длиной сторон. Тогда вычисления поля скорости внутри ячейки можно выполнить при помощи хорошо знакомых формул би- и трилинейной интерполяции над единичным квадратом или кубом соответственно. При необходимости такие координаты могут быть легко преобразованы в географические координаты и обратно.

На втором этапе осуществляется моделирование динамики заданных в начальный момент времени лагранжевых частиц совместно и синхронно с моделью гидродинамики океана. Так, после завершения основных прогностических расчетов гидродинамической модели для определения нового положения/состояния частиц выполняется алгоритм определения состояния частицы.

После завершения прогнозирования координат всех присутствующих на локальном узле частиц выполняется процедура обмена данными с соседними вычислительными узлами. Так лагранжевы частицы осуществляют перемещения

от узла к узлу в соответствии с их новыми координатами и динамикой жидкости, описываемой гидродинамической моделью океана.

Расчетная модель не может работать изолированно, она является частью комплекса моделей, объединенных в единую систему методами Компактной Вычислительной Платформы (CMF 2.0/3.0).

Базовой идеей, заложенной в реализацию последней версии CMF 3.0, является декомпозиция функционала системы на три составляющие: клиентские компоненты, осуществляющие непосредственное моделирование геофизических процессов (океан, лед, атмосфера и др.); сервисы, реализующие обслуживающий функционал, необходимый для эффективной работы компонентов; непосредственно инфраструктура (ядро) вычислительной платформы, предоставляющая программный интерфейс. Такой подход к разработке программного обеспечения принято называть «Сервис-ориентированной архитектурой».

Основной функционал, реализованный в рамках ядра CMF 3.0 в виде программного интерфейса для компонентов и сервисов, представляет собой методы регистрации массивов данных, и различных событий, связанных с этими массивами. Для успешной интеграции модели лагранжевых частиц потребовалось расширить функционал CMF 3.0, чтобы он поддерживал регистрацию массивов, размеры которых могли бы отличаться от размеров расчетных областей.

Таким образом, процедура загрузки и сохранения данных в системе семантически соответствует принятой в CMF 3.0 реализации параллельного отложенного взаимодействия с файлами, однако теперь она позволяет обрабатывать массивы заданных размеров.

Руководствуясь этими требованиями, в программный модуль была встроена подпрограмма, которая считывает конфигурационный файл модели океана, содержащий следующие параметры для каждого заданного в лагранжевой модели источника: количество частиц, координаты центра, масштаб вдоль осей X (долгота), Y (широта) и Z (глубина), состояние и др. Код подпрограммы использует эти параметры для создания случайно распределенных в пределах эллипсоида набора частиц с определенным состоянием. Реализованные усовершенствования позволят решать целый класс задач по переносу радионуклидов в океанической акватории в условиях генерации радионуклидов сложным комбинированным набором источников. В частном случае источник может быть

задан: в единственном экземпляре, включающем точечный источник непосредственного поступления загрязнения от аварийного объекта; распределенным во времени и пространстве поверхностным источником от осаждения радионуклидов из атмосферы на поверхность воды или льда с последующим таянием льда; распределенным во времени и пространстве объемным источником от выноса радионуклидов из заливов в открытое море.

Усовершенствованная модель носит название ВИТИМ 3.1.

Проведение тестового расчета по усовершенствованной модели и анализ полученных результатов

Для усовершенствованной океанической модели Арктического региона Океан-Лед-Атмосфера ВИТИМ 3.1 была сгенерирована сетка в Северной двухполярной системе координат с разрешением 0.1° , где сферическая система координат с началом в центре Земли использовалась в диапазоне широт $[50^\circ; 60^\circ]$ с. ш., а выше — с центром на уровне 60° с. ш. Разрешение расчетной области по долготе составило 3600 точек, по широте — 400 (для обеих систем координат) и по вертикали — 49 уровней. Батиметрия выбранного региона сгенерирована на основе данных ETOPO5 методами билинейной интерполяции. Начальные распределения температуры и солёности были получены из среднегодовых значений данных WOA2009. Поле скорости в начальный момент времени было выбрано нулевым. Условия непротекания задавались для топографии и на границах расчетной области. Временная дискретизация модели была задана равной 4 минутам.

В качестве численной модели динамики льда использовалась CICE 5.1. Атмосферное воздействие на поверхности океана и льда определялось нормальным годовым циклом в соответствии с условиями международного эксперимента CORE-I. Данные представлены в виде шестичасовых полей температуры, влажности, плотности воздуха и скорости ветра на высоте 10 м и давления на уровне моря, среднесуточных потоков солнечной и длинноволновой радиации с учетом облаков и среднемесячных значений осадков. Пространственное разрешение массивов $\sim 1.875^\circ$ (192×94 точек). Передача данных из компоненты атмосферы в компоненты океана и льда с соответствующей переинтерполяцией на целевые сетки выполнялась с максимально возможной частотой — каждые 6 часов расчетного времени.

Основной целью численного эксперимента являлось тестирование совместного исполнения Эйлеровой модели и Лагранжевой модели, начальные данные для которой бы задавались в виде нескольких источников радионуклидов. Модель Лагранжева переноса была настроена для вычисления динамики частиц от трех источников:

- точечный источник в открытом океане;
- источник плоской прямоугольной формы в Кольском заливе;
- прямоугольный объемный источник в Кольском заливе.

В первый месяц тестового моделирования осуществлялся разгон глобальной модели циркуляции, необходимый для адаптации заданных начальных условий к естественным физическим процессам. В этот период модель Лагранжа бездействует.

По истечении «адаптационного» месяца в процесс моделирования включаются все три источника лагранжевых частиц. Точечный источник работает в течение 20 дней, создавая частицы с частотой 10 частиц/мин общей численностью 288000 частиц. Плоскостной поверхностный источник имеет размеры 1000×200 м, работает в течение 24 часов с частотой 100 частиц/мин (всего 144000 частиц). Объемный источник имеет линейные размеры по поверхности 10×20 м и до дна по глубине, работает в течение 10 суток и частотой 10 частиц/мин (всего 144000 частиц). Начальные координаты частиц генерируются случайным образом в пределах границ заданного источника. Начальная скорость частиц определяется потоком жидкости или скоростью движения льда в точке их рождения. После процедуры генерации Лагранжевых частиц совместная модель продолжала в тестовом расчете свое выполнение еще в течение двух месяцев расчетного времени.

Результаты выполнения описанного выше эксперимента по совместному моделированию процессов циркуляции региона Арктики и динамики Лагранжева переноса продемонстрировали полную согласованность траекторий частиц и волновых процессов в соответствующих районах Северного Ледовитого океана. В свою очередь, это подтверждает правильность разработанной модели Лагранжа ВИТИМ 3.1. Таким образом, представленная реализация совместной модели Эйлера — Лагранжа может быть успешно использована для моделирования динамики распространения загрязнений в Арктической зоне.

2. Сбор актуальной информации и создание базы данных по проблемам радиационной безопасности организаций РАН в целях разработки долгосрочного прогноза состояния РБ и плана ее повышения

Общие положения

Целью работы является разработка специальной базы данных (БД) по проблемам радиационной безопасности (РБ) на объектах РАН, что позволит планировать деятельность на годы вперед в порядке приоритетности, эффективно распределять ресурсы с учетом радиационных рисков, а также обеспечивать контроль деятельности, соблюдение сроков и нормативов. На втором этапе работы БД будет заполнена данными о завершенных и текущих проектах, а также разработано программное обеспечение для взаимодействия с БД — информационная система управления проектами (ИСУП).

На первом этапе работы в 2021 г. проведена разработка модели «сущность-связь» («entity-relationship») — ER модели, служащей прототипом базы данных для хранения и систематизации информации по проблемам радиационной безопасности на объектах Российской академии наук. Для этого была **проведена систематизация и структуризация выполненных за 12 лет практических работ** в рамках Федеральных целевых программ по обеспечению ядерной и радиационной безопасности (ФЦП ЯРБ). Работы проводились в **45 организациях РАН**, было **выполнено свыше 500 проектов** по следующим направлениям:

- модернизация и развитие систем радиационного и дозиметрического контроля;
- организация непрерывной работы систем физической, антитеррористической и противопожарной защиты.
- приведение состояния помещений для работы с источниками ионизирующего излучения, радиоактивными веществами, радиоактивными отходами в соответствии с требованиями федеральных норм и правил (ФНП) Российской Федерации;
- восстановление работоспособности и модернизация спецсистем (специальная вентиляция, специализированная канализация, биологическая защита и др.);

Кроме того, в исследование была включена информация о необходимых мероприятиях по повышению ядерной радиационной безопасности. Для этого в 2021 г. были разосланы запросы в **148 организаций РАН** и в **35 организаций высшего образования**, подведомственных Ми-

нистерству науки и высшего образования РФ. В результате **59 организаций РАН** и **22 организации высшего образования** из числа опрошенных заявили о необходимости проведения работ по повышению ЯРБ. **Все необходимые работы были разделены на 6 направлений:**

1. Обследование и дезактивация помещений для работы и хранения источников ионизирующего излучения (ИИИ), радиоактивных веществ (РВ) и радиоактивных отходов (РАО), обследование и реабилитация радиационно загрязненных территорий.
2. Вывод из эксплуатации радиационных установок, подготовка к вывозу на захоронение отслуживших ИИИ и РАО.
3. Модернизация систем радиационного и дозиметрического контроля.
4. Модернизация систем физической и противопожарной защиты хранилищ и помещений для работы с ИИИ.
5. Приведение помещений для работы с ИИИ, РВ и РАО в соответствии с требованиями ФНП.
6. Модернизация инженерных спецсистем (специальная вентиляция, специализированная канализация, биологическая защита и т. д.).

В отдельное направление были выделены иные работы и проблемные вопросы по повышению РБ. В основном проблемные вопросы затронули организацию обучения и аттестации персонала.

Для разработки любого перспективного (стратегического) плана необходимо определить структуру декомпозиции работ (СДР, в английской терминологии Work Breakdown Structure, WBS). Ранее была принята следующая СДР:

- 1 – вид деятельности мероприятия;
- 2 – регион расположения учреждения (предприятия);
- 3 – порядковый номер учреждения (предприятия) в регионе;
- 4 – мероприятия (проекты) вида, определенно-го уровнем 1, которые необходимо выполнить в учреждении, определенном уровнем 3.

Если объем работ по мероприятию уровня 4 слишком велик (например, его длительность превышает горизонт планирования), мероприятие может быть разбито на этапы (фазы), образующие уровень 5.

Для того чтобы корректно заполнить элементы БД данными об уже выполненных проектах, целесообразно сохранить принятое ранее административно-территориальное деление

и нумерацию организаций в пределах региона (уровни 2 и 3 в СДР). Однако для гибкости подхода целесообразно дополнительно учесть более глобальные современные справочники свободного доступа, которые возможно обновлять автоматически.

Переход к глобальным справочникам позволит достаточно легко актуализировать общую информацию и динамически формировать новый уникальный код СДР, где основным (первым уровнем) в зависимости от удобства и целей может быть выбрано не территориальное деление, а любой другой уровень. Сохранение истории по старым классификаторам и указанная связь с новыми правилами обеспечат сравнительный анализ во времени.

ER-модель БД для сопровождения проектов по повышению РБ

Для решения оптимизационной задачи эффективного управления ресурсами на современном уровне невозможно обойтись без применения принципов программирования и построения информационной системы управления проектами (ИСУП), основным предназначением которой является:

- информационно-аналитическая поддержка управленческих решений;
- предоставление доступа к актуальным данным о состоянии проектов всем участникам;
- учет взаимного влияния друг на друга подготавливаемых к реализации программных мероприятий (проектов) и имеющегося потенциала промышленной инфраструктуры;
- автоматизация процессов документооборота по проектам и др.

Информационная система (ИС) позволяет своевременно планировать финансирование наиболее ответственных мероприятий и, наоборот, избегать преждевременных затрат, а также является инструментом имитационного моделирования для прогнозирования принимаемых управленческих решений.

Ядром ИС является база данных, предназначенная для накопления и структурированного хранения информации по радиационным проблемам на объектах РАН, оценочной стоимости их решения, ведения документации по договорам и пр. Логические связи между сущностями наглядно отображаются в виде диаграммы модели «сущность-связь» («entity-relationship») или ER-модели. Связи между сущностями указывают на характер логической зависимости

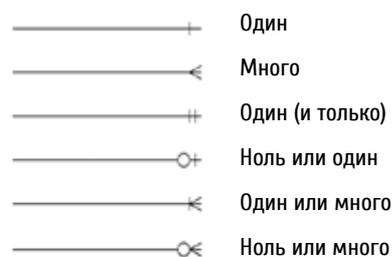


Рис. 2.2.17 – Графическое обозначение типов связей между сущностями в нотации «Crow's Foot» («вороньи лапки»)

между ними и на ER-диаграмме отображаются в какой-либо стандартной нотации. В данной работе принята наиболее распространенная нотация «Crow's Foot», приведенная на рис. 2.2.17.

Выявленные в ходе анализа данных сущности объединены в блоки в соответствии с их смысловым содержанием:

1. Организации.
2. Справочники.
3. Договоры.
4. Проблемы РБ
5. Приоритезация.
6. Документация.
7. Служебные таблицы БД.

Всего в спроектированной БД идентифицировано 46 таблиц.

На рис. 2.2.18 представлена ER-диаграмма модели базы данных для хранения и систематизации информации по проблемам РБ на объектах РАН. В качестве РК и FK на диаграмме обозначены первичные и внешние ключи (primary и foreign соответственно) — ключевые атрибуты в родительских и дочерних таблицах для обеспечения связей между ними.

Несомненным преимуществом ER-диаграммы является её концептуальность и обособленность от конкретных систем управления базами данных (СУБД). После завершения работы над ER-диаграммой необходимо выбрать из собственных потребностей/возможностей СУБД и трансформировать модель данных в цифровую БД. В данной работе в качестве сервера баз данных использовался Microsoft® SQL Server 2017 Express Edition.

В некоторые сущности на ER-диаграмме (рис. 2.2.18) добавлено поле **IdDoc** с типом данных BIT. Таким способом отмечены таблицы, к Id полю которых может быть прикреплено необходимое количество поясняющих документов: акты, план-графики, фото, отчеты о ходе работ на сетевом графике и пр. При создании БД каждой из этих таблиц присваивается

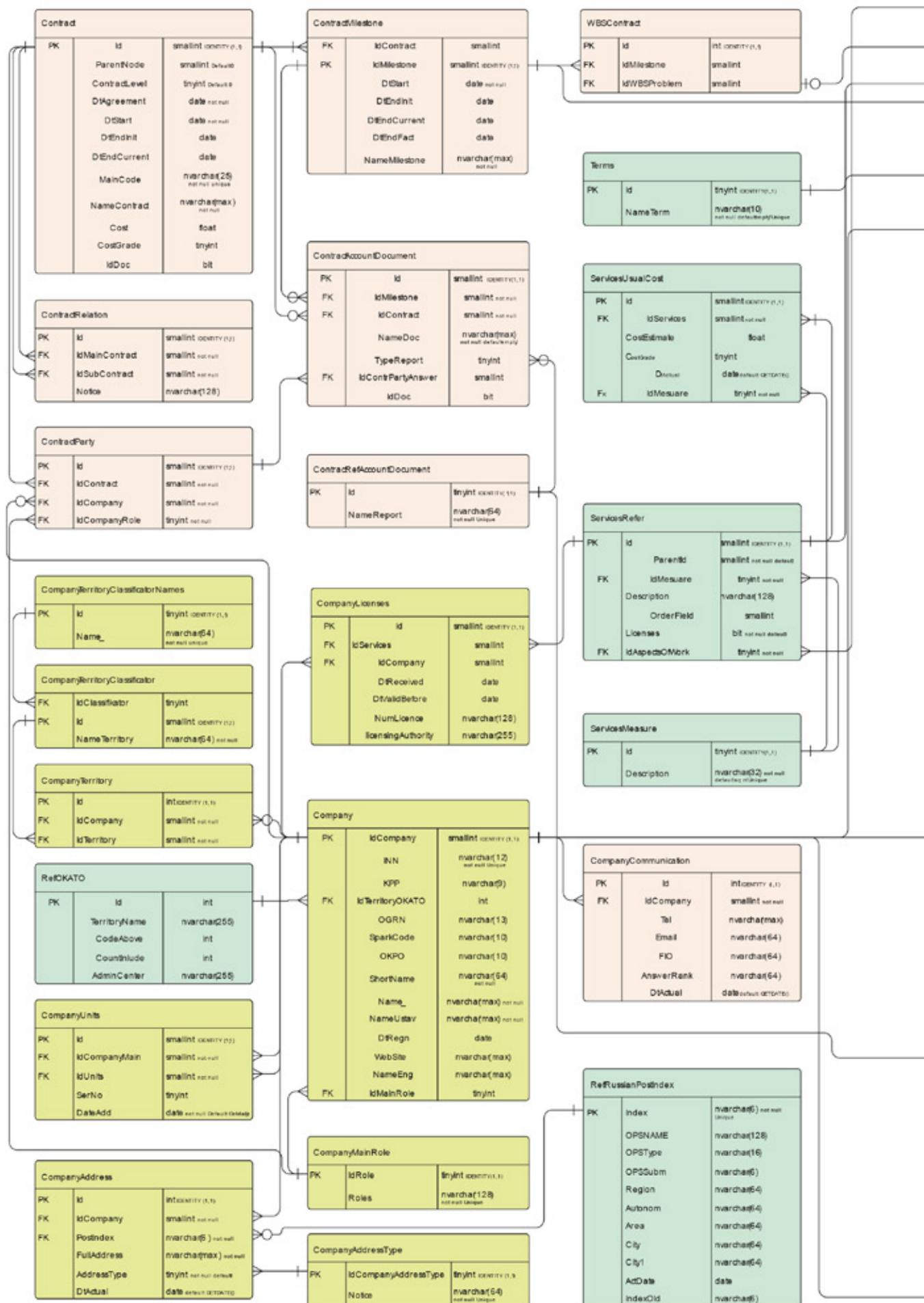
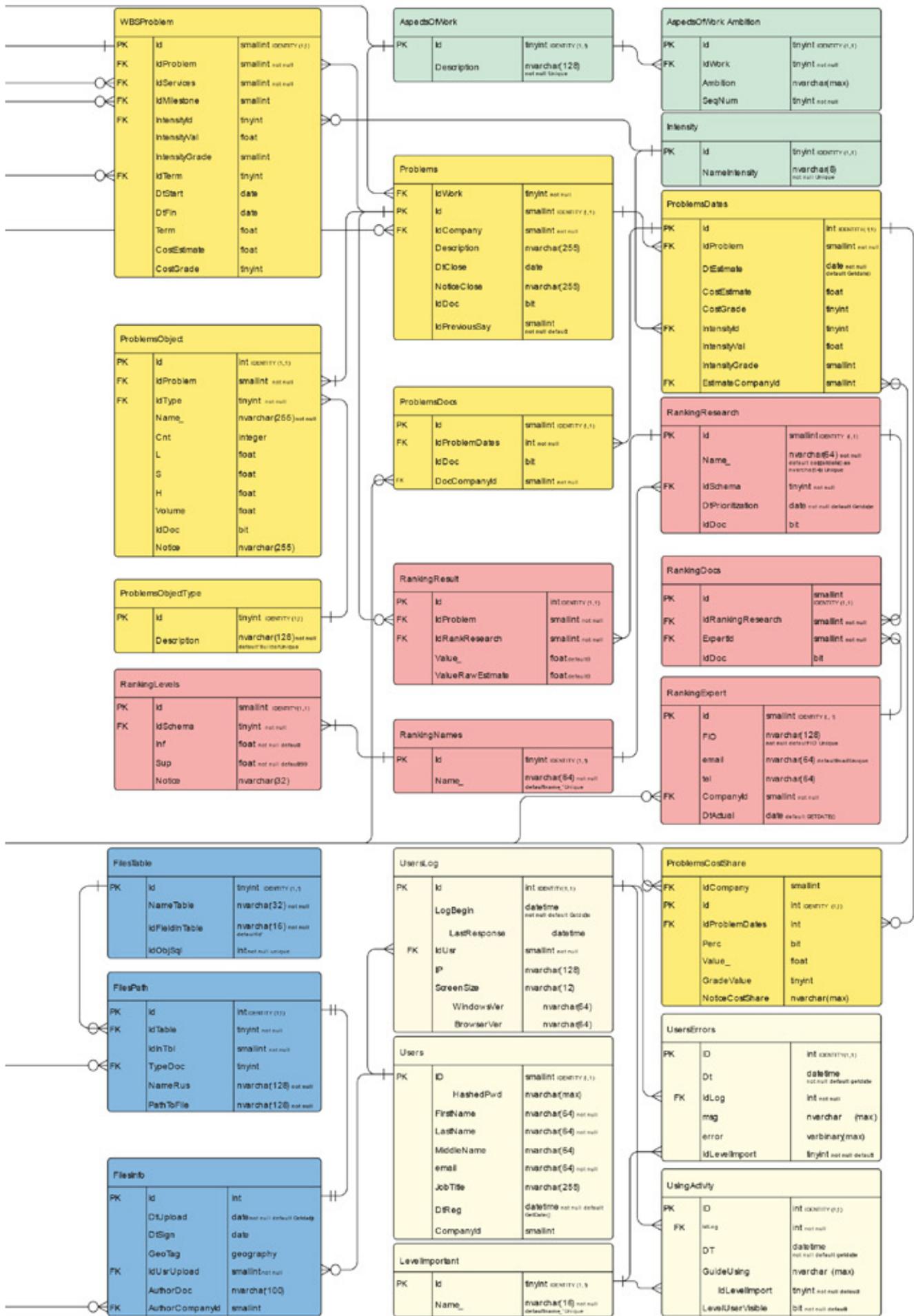


Рис. 2.2.18 – ER-диаграмма модели базы данных



Организация | Справочники | Договоры | Проблемы РБ | Приоритизация | Документы | Служебные таблицы

свой уникальный номер, а также записываются имена таблицы и поля первичного ключа в ней (**FilesTable**). Организованное таким образом хранение документов позволит:

- использовать всего одну таблицу с перечислением системных путей к документам (FilesPath), которая реализует связь одно-ко-многим сразу к нескольким таблицам (Contract, ProblemsDocs, RankingDocs...);
- не создавать в каждой из таблиц с IdDoc поле с типом UNIQUEIDENTIFIER, чем достигается оптимизация объема базы на жестком диске;
- за ненадобностью и для экономии дискового пространства удалить поле IdDoc из всех таблиц после создания БД и таблицы FilesTable.

Клиентская часть информационной системы

Заполнение базы данных исключительно средствами языка Data Manipulation Language (SQL DML) требует значительных затрат времени, к тому же не позволяет оперативно выявлять неточности в соотношениях и проводить проверку целостности данных. Пользовательский интерфейс создает удобную среду для оператора и реализует логику алгоритмов, позволяя последовательно заполнять и обрабатывать информацию, задавать уточняющие вопросы через дочерние (подчиненные) формы, а также перехватывать ошибки. Интуитивно понятный интерфейс не требует от пользователя экспертных знаний в программировании или хранении данных, но при наличии знаний в предметной области позволяет интерактивно построить наглядные отчеты, проверить их содержание, визуализировать информацию и обнаруживать зависимости. Примеры реализации таких интерфейсов, использованных на этапе разработки, приведены на рис. 2.2.19, 2.2.20.

С использованием объектно-ориентированного языка программирования VB.Net в качестве прототипа было разработано приложение типа **Windows Forms**, посредством которого осуществляется взаимодействие пользователя и БД. На данном этапе работы основной целью являлось создание сервиса с минимальным набором функций для проверки созданной ER-диаграммы.

ИСУП служит цели информационно-аналитической поддержки управленческих решений. Информационное пространство БД многомерно, пользователь должен иметь возможность взглянуть на информацию в разрезе различных измерений. Так, например, пользователем могут быть сформулированы запросы:

- найти все организации, где были проведены работы или существуют проблемы заданного типа;
- показать все работы выбранного госконтракта на заданном периоде;
- построить сетевой график (диаграмма Ганта) в отношении заданной организации на прошедшем и перспективном периодах и др.

При построении отчетов выбор графического представления осуществляется с учетом типа данных и их предназначения. В ИБРАЭ РАН на основе обобщения информации о выполненных за истекшее десятилетие работах по повышению радиационной безопасности организаций РАН разработан **формуляр запроса для сбора и актуализации исходных данных о текущих проблемах в области радиационной безопасности в этих организациях**. Ежегодно формуляр направляется организациям с целью уточнения данных. Почтовый индекс в адресах предприятий позволяет отобразить на географической карте обобщенные данные, например:

Рис. 2.2.19 – Последовательное заполнение всей существенной информации по договору

Рис. 2.2.20 – Последовательное заполнение всей существенной информации по организации

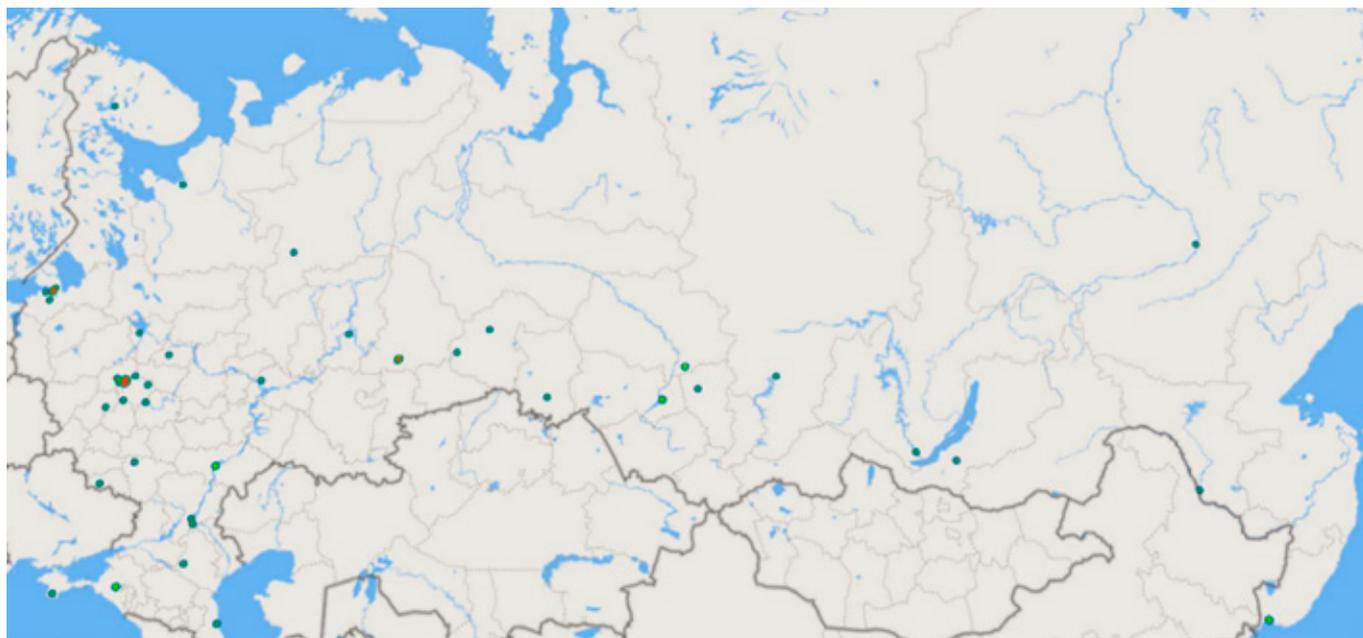


Рис. 2.2.21 – Города, в которых находятся организации, получившие по Почте России формуляр для актуализации данных. Цвет и яркость точки соответствуют масштабу проблем

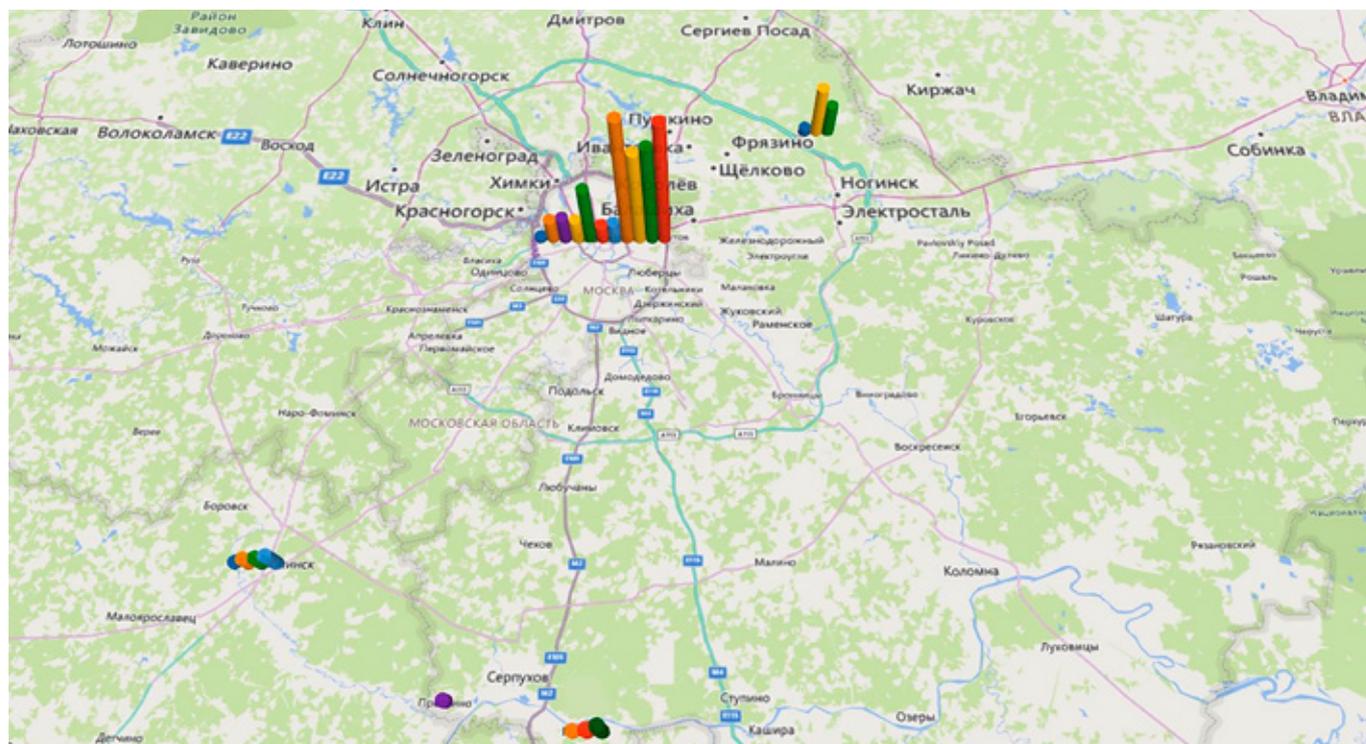


Рис. 2.2.22 – Количество выполненных работ по повышению РБ в Москве и Московской области в период 2009–2020 гг.

- количество организаций, получивших запросы (рис. 2.2.21);
- количество проектов по годам в заданном регионе (рис. 2.2.22);
- заданную выборку по типу радиационных проблем;
- величину радиационного потенциала;
- вид PAO;
- суммарную величину ассигнований для решения проблем и др.

Наглядным представлением информации о ходе работ по проектам является диаграммы Ганта. В качестве примера приведена **диаграмма Ганта для проекта конверсии объекта** (рис. 2.2.23). Проект включает в себя несколько этапов: сбор и анализ информации, КИРО, КИХО, замена систем спецвентиляции и канализации, чистовые работы. На рис. 2.2.23 зеленым цветом отмечен фактический прогресс выполнения этапа.



Рис. 2.2.23 – Последовательность работ и их взаимосвязь для достижения конечной цели

3. Реконструкция и оценка последствий ядерной аварии на АПЛ в бухте Чажма

В 2021 г. подведены итоги совместных исследований ИБРАЭ РАН и ДВО РАН по реконструкции и оценке последствий ядерной аварии на АПЛ в бухте Чажма, проводившиеся под руководством академика А. А. Саркисова.

Это событие явилось самой крупной аварией на транспортных ЯЭУ в истории СССР/России и всех атомных флотов мира и соответствует уровню 5 по Международной шкале INES.

В процессе исследований были восстановлены и уточнены исходные данные для прогноза, анализа и оценки радиационной обстановки после аварии в Приморском крае и прилегающих районах. Обоснованы и уточнены начальные, граничные условия, включающие источники радиоактивного загрязнения, мощность выброса определяющих дозообразующих радионуклидов, погодные условия и особенности переноса радиоактивного облака над судоремонтным заводом, полуостровом Дунай, заливом Петра Великого и Приморским краем, а также состояние морской среды на прилегающих акваториях.

Это позволило в сочетании с натурными данными, полученными сразу после аварии и в последующие годы специалистами Тихоокеанского флота, на основе восстановленных погодных условий на день события и состояния морских акваторий выполнить ретроспективный прогноз, оценить радиационные последствия аварии для населения Приморья и приграничной части Китая до 400 км от источника и на акваториях до 250 км.

Радиационные последствия аварии

Следует отметить, что авария в б. Чажма по характеру радиоактивного загрязнения имела существенную отличительную особенность. Самоподдерживающаяся цепная реакция (СЦР) возникла в реакторе со свежезагруженным

топливом, в котором еще не накопились долгоживущие продукты деления, а при взрыве образовалось их в десятки тысяч — миллионы раз меньше, чем при авариях на Чернобыльской АЭС и АЭС «Фукусима-1». По этой причине определяющим для населения дозообразующим радионуклидом, включая его накопление в окружающей природной среде, являлся ^{60}Co , а не $^{131-135}\text{I}$, ^{137}Cs и ^{90}Sr , которые преобладают в отработавшем ядерном топливе.

В результате аварии радиоактивные вещества распространились по заводу и за его пределами в радиусе 0,9—1 км. Недопустимые для населения значения минимальной экспозиционной дозы (МЭД) свыше 0,6 мкЗв/ч наблюдались на расстоянии 0,7—0,8 км в прилегающем лесном массиве и акватории б. Чажма. После распада короткоживущих радионуклидов на десятые сутки область загрязнения сократилась до 0,5—0,6 км и стала входить в границу предприятия. Исключение составил радиоактивный след, образовавшийся в северной его части, где мощность дозы достигала 0,5—1,2 мЗв/ч, β -загрязнение — $2 \cdot 10^5$ част./($\text{см}^2 \cdot \text{мин}$). След вышел за пределы территории завода и пересек необитаемый п-в Дунай в западном направлении.

Из прогноза следовало, что после выхода радиоактивного облака за пределы судоремонтного завода основное количество радиоактивных веществ при его прохождении над п-вом Дунай было сосредоточено в приземном слое атмосферы высотой до 200 м.

За время прохождения радиоактивного облака с места аварии через п-в Дунай (5,5 км) к вершине Уссурийского залива (60 км) объемная активность дозообразующих радионуклидов в воздухе в результате радиоактивного распада, рассеяния и вымывания атмосферными осадками понизилась в 10^5 — 10^6 раз, а через сутки в 400 км — в 10^7 — 10^8 раз (рис. 2.2.24). Наибольшее загрязнение побережья залива было отмечено на необитаемом м. Седловидный, кото-

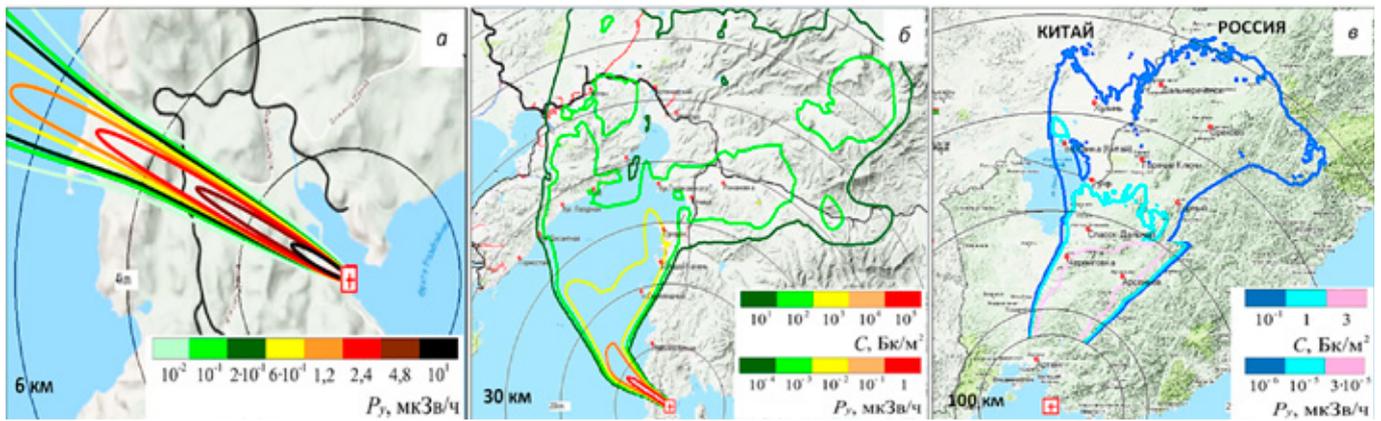


Рис. 2.2.24 – Изменение плотности выпадения и мощности дозы ⁶⁰Со на п-ве Дунай (а), в акватории Уссурийского залива (б), на территории Приморья и в приграничной зоне Китая (в)

рый прилегает к береговому следу (3,8 кБк/м², 0,03 мкЗв/ч). В остальных местах оно не превышало 0,7—1,0 кБк/м² и 0,01 мкЗв/ч. В отдаленных районах Приморья и приграничной зоне Китая эти показатели были меньше и соответствовали 0,01—1% от фона. На всех стадиях аварии долговременное загрязнение окружающей среды на 95—99% определялось ⁶⁰Со, что соответствует характеру аварии.

Ядерный и радиационный риски, дозовые нагрузки для персонала и населения

Российскими нормами радиационной безопасности (НРБ-99/2009) предел индивидуального риска техногенного облучения лиц из персонала и населения установлен $1 \cdot 10^{-3}$ и $5 \cdot 10^{-5}$ (чел.·год)⁻¹ соответственно, а при облучении природными радионуклидами (фон) $\sim 1,6 \cdot 10^{-5}$ (чел.·год)⁻¹. Дозы, полученные ликвидаторами аварии, во многих случаях соответствовали 0,005 Зв, однако часть людей получила и большие значения дозы (табл. 2.2.1).

На наиболее опасных участках залива и юге Приморского края были оценены время контакта населения с радиоактивным облаком, плотность

радиоактивного выпадения основных дозообразующих радионуклидов, соответствующие дозовые нагрузки в городах и поселках, попавших в зону загрязнения. Восстановление радиационной обстановки на судоремонтном заводе путем ретроспективного прогноза с учетом данных натурных наблюдений в контрольных точках в первые сутки после аварии показало, что прилегающие поселки не подвергались радиоактивному загрязнению. Они были защищены расстоянием 1,1—1,7 км, сопками высотой 30—130 м, покрытыми лесом с подлеском, а также барьером из сооружений, кораблей и доков.

В первые сутки после аварии наибольшие дозы получили работники, занятые в мероприятиях по реабилитации — в тушении пожара и борьбе за живучесть АПЛ, включая дезактивацию проходов в береговой полосе и на пирсах, в удалении радиоактивных выпадений с поверхности кораблей и судов, в сборе высокоактивных фрагментов активной зоны, извлечении крышки реактора из отсека, подготовке АПЛ к отправке в отстой (военнослужащие получили от 1,5 до 0,05 Зв — 261 чел., персонал завода получил от 0,25 до 0,05 Зв — 44 чел). Ликвидация

Таблица 2.2.1. Индивидуальный радиационный риск (г) при ликвидации последствий ядерной аварии в б. Чажма, (чел.·год)⁻¹

Диапазон доз, Зв	Военнослужащие		Служащие	
	Чел.	г, 10 ⁻⁶	Чел.	г, 10 ⁻⁶
>1,5	1	>2000	-	-
1,0–1,5	25	1440–2000	-	-
0,5–1,0	23	720–1440	-	-
0,25–0,5	43	360–720	2	360–720
0,15–0,25	36	220–360	1	220–360
0,05–0,15	133	73–220	41	73–220
0,005–0,05	643	7–73	284	7–73
< 0,005	9	1–7	600	1–7

последствий аварии продолжалась 9 месяцев, к ней дополнительно привлекли еще около 1900 чел. (0,005—0,05 Зв). На начальной ее стадии для ~5% военнослужащих последствия оказались выше предела индивидуального риска для персонала ($>10^{-3}$, опасность высокая), а на последующих этапах основной контингент ликвидаторов подвергался опасности среднего (10^{-5} — 10^{-3}) и низкого (10^{-6} — 10^{-5}) уровня.

Для понимания особенностей функционирования и опасности объектов малой атомной энергетики, к которой относятся транспортируемые и корабельные ЯЭУ, следует принять во внимание, что с 1960 г. по настоящее время на территориях и акваториях, прилегающих к пунктам базирования и обеспечения кораблей

ТОФ, содержание радионуклидов в ОПС и МЭД соответствуют фону. Только ядерная авария в б. Чажма привела к нарушению радиационной обстановки в районе ее возникновения, на части территории завода и за его пределами на п-ве Дунай в области радиоактивного следа. В меньшей степени последствия проявили себя в пункте отстоя АПЛ в б. Павловского.

Уроки тяжелой аварии в б. Чажма еще раз показали необходимость безусловной приверженности эксплуатационного персонала духу и основным положениям культуры безопасности, главнейшим из которых является придание первостепенного значения этой проблеме, как обладающей наивысшим приоритетом при эксплуатации объектов ядерной энергетики.

КЛЮЧЕВЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАБОТ

1. Саркисов А. А., Антипов С. В., Билашенко В. П., Ильющенко Г. Э., Высоцкий В. Л., Кобринский М. Н., Сотников В. А., Шведов П. А. Математическое моделирование коррозионного разрушения объектов морского базирования // Атомная энергия. — 2021. — Т. 130. — Вып. 1. — С. 7–13.
2. Саркисов А. А., Антипов С. В., Билашенко В. П., Высоцкий В. Л., Дзама Д. В., Кобринский М. Н., Припачкин Д. А., Смоленцев Д. О., Шведов П. А. Разработка и применение интегрированной системы математических моделей переноса радионуклидов после гипотетической аварии с целью минимизации радиозэкологич-

ческих последствий // Арктика: экология и экономика, 2021. — Т. 11. — № 3. — С. 313–326.

3. Sarkisov A. A., Vysotskii V. L. The largest nuclear accident in the history of the nuclear fleet. Reconstruction of events and analysis of the accident consequences to assess the risks and hazards of small nuclear power facilities. // Nuclear Engineering and Design. — 2021. — vol. 384, — pp. 1–25.
4. Билашенко В. П. Величие России будет прирастать Арктикой — атомной! // Радиоэлектронные технологии. — 2021. — № 2. — С. 4–9.

2.3. БЕЗОПАСНОСТЬ НАСЕЛЕНИЯ

Начиная с середины 1990-х гг. специалисты Института активно участвовали в разработке научных основ, создании и развитии систем мониторинга радиационной обстановки и аварийного реагирования. 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. В 2021 году значительное внимание было уделено развитию прикладных технологий для задач оценки, анализа и прогноза радиационной обстановки, а также в области мобильного радиационного контроля.

С 1995 года в Институте функционирует Технический кризисный центр (ТКЦ), в 2013 году преобразованный в Центр научно-технической поддержки (ЦНТП) ИБРАЭ РАН. Центр в круглосуточном режиме осуществляет научно-техническую, информационно-аналитическую и экспертную поддержку федеральных и региональных органов власти, федеральных и ведомственных кризисных центров в области радиационного мониторинга и аварийного реагирования на чрезвычайные ситуации с радиационным фактором, подготовку и проведение тренировок и учений на объектах использования атомной энергии, выработку рекомендаций по противодействию угрозам радиологического терроризма.

В настоящее время научные исследования и практические работы в данной области осуществляют два отделения — Отделение развития систем аварийной готовности и реагирования ИБРАЭ РАН и Отделение научно-технических проблем развития комплексных систем мониторинга.



РАЗВИТИЕ СИСТЕМ РАДИАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА, 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)

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

- 1** ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО МОДЕЛИРОВАНИЮ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ В АТМОСФЕРЕ
- 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 ИБРАЭ РАН НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ И ЭКСПЕРТНОЙ ПОДДЕРЖКИ МЕРОПРИЯТИЙ ПО АВАРИЙНОМУ РЕАГИРОВАНИЮ НА ЧС С РАДИАЦИОННЫМ ФАКТОРОМ, ОСУЩЕСТВЛЯЕМЫХ НА ОТРАСЛЕВОМ, РЕГИОНАЛЬНОМ И ФЕДЕРАЛЬНОМ УРОВНЯХ

КЛЮЧЕВЫЕ СПЕЦИАЛИСТЫ

С. Л. Гаврилов — заведующий Отделением научно-технических проблем развития комплексных систем мониторинга. Реализация прикладных разработок в области создания и развития объектовых и территориальных систем радиационного мониторинга (gav@ibrae.ac.ru);

Е. В. Антоний — проектирование, разработка и внедрение информационных систем для задач аварийной готовности и реагирования на ЧС с радиационным фактором (antoniy@ibrae.ac.ru);

А. А. Киселев, к.т.н. — разработка и применение программных средств моделирования переноса РВ в атмосфере (aak@ibrae.ac.ru);

Р. И. Бакин — вопросы радиационной безопасности и радиационного контроля (ravil@ibrae.ac.ru);

А. В. Шикин — вопросы радиационной защиты и взаимодействия ионизирующих излучений с веществом (shi@ibrae.ac.ru);

Д. В. Арон, к.э.н. — оценка экономических ущербов при радиационных авариях (aron@ibrae.ac.ru);

В. В. Гайдуков — разработка программного обеспечения для задач радиационного мониторинга (gvv@ibrae.ac.ru);

И. Г. Акимова — проектирование архитектуры систем радиационного мониторинга и информационных систем для задач аварийной готовности и реагирования на ЧС с радиационным фактором (akimova@ibrae.ac.ru)

Ключевые молодые специалисты: П. А. Коняев, А. С. Осадчий, В. И. Бычкова

ОСНОВНЫЕ ИТОГИ 2021 ГОДА

1. Комплексный анализ радиационных последствий аварий с учетом неопределенностей (Киселев А. А., Ильичев Е. А., Рубинштейн К. Г.)

В 2021 г. в ИБРАЭ РАН получила принципиальное развитие компьютерная система оперативного прогноза параметров радиационной обстановки, предназначенная для моделирования атмосферного переноса и доз облучения населения в условиях тяжелых аварий, сопровождающимися значительными значениями выброса радиоактивности в атмосферу, большими длительностями и неопределенностями, затрудняющими оценку источника и атмосферного переноса. В таких ситуациях основной задачей является своевременная и адресная защита населения, которая затруднена в связи с масштабами событий. Поэтому инструменты анализа и прогноза являются одним из основных средств для поддержки принятия решений по мерам защиты населения и оптимизации мер защиты населения. В 2021 г. был создан научно-технический задел для формирования современной прогностической системы, позволяющей выполнять комплексный анализ аварии и ее последствий и учитывающей атрибутивные ситуации неопределенности. При этом были

исследованы и интегрированы научно-технические программные решения, направленные на повышение точности моделирования и онлайн-оценку качества прогнозируемых параметров. В том числе:

- создана агрегирующая база приземных и аэрологических наблюдений, пополняемая из российских и международных систем;
- внедрена система онлайн-анализа и прогноза метеорологических полей, позволяющая оценивать качество моделирования прогнозируемой метеорологической обстановки как в детерминированном плане, так и с учетом неопределенности реализации тех или иных метеорологических условий;
- реализованы модели для численного прогноза осаждения радиоактивных веществ на подстилающую поверхность с учетом структуры атмосферных течений и приоритетного типа подстилающей поверхности;
- улучшено пространственное разрешение прогнозируемых метеорологических полей, что позволило повысить достоверность результатов как в ближней зоне, так и на удалении от места выброса.

2 Обоснование радиационной безопасности населения при выводе из эксплуатации ОИАЭ (Киселев А. А., Красноперов С. Н., Шикин А. В.)

При решении задач оценки решений по демонтажу объектов, находящихся на заключительных стадиях жизненного цикла (ЗСЖЦ), необходим комплексный анализ, включающий оценку возможного радиологического воздействия на население при проведении работ с образованием загрязненной радиоактивными веществами пыли, которая может попадать в атмосферу через негерметичные швы и/или через системы вентиляции, в связи с чем реализуется атмосферный перенос и должна быть оценена степень воздействия на население. Примерами таких работ, выполненных в 2020—2021 гг., являются: оценки доз облучения для сценариев планируемого демонтажа здания одного из объектов АО «АЭХК»; оценки характеристик загрязнения территории и доз облучения населения в результате проведения работ по выводу из эксплуатации одного из объектов ФГУП «ГХК»; оценки характеристик загрязнения территории и доз облучения жителей г. Санкт-Петербург в результате планируемых работ по выводу из эксплуатации объектов АО «Радиевый институт им. В.Г. Хлопина». В качестве исходных данных при оценке запасов активности используются данные по количеству РАО различных категорий, находящихся на площадках, и результаты комплексного инженерного и радиационного обследования объектов.

Для проведения расчетного анализа для такого класса задач была разработана методология,

реализованная в виде комплекса программных средств. Принципиальным отличием от ранее применявшихся подходов является детализированный учет географических особенностей расположения объекта, окружающих территорий, влияющих на отклонение направления переноса (например, наличия воздушных потоков вдоль русел рек, орографии и т.д.), суточных и сезонных переносов воздушных масс, а также учет графика производственного процесса. Для анализа использовались многолетние данные метеорологического мониторинга, данные глобального анализа метеорологических параметров, приведенные с использованием региональной метеорологической модели к метеорологическим полям высокого пространственно-временного разрешения. На их основе для каждой производственной площадки были проведены расчеты атмосферного переноса и доз облучения для основных сценариев: как на основе среднегодовых значений концентраций и выпадений, так и с использованием технологии смещения времени начала выброса, что позволило определить наименее благоприятные условия выброса и получить соответствующие оценки неопределенности прогноза.

Несмотря на то что результаты расчетов во всех случаях показали, что годовые дозы облучения населения за счет выбросов, обусловленных проведением работ по выводу из эксплуатации объектов, не превысят установленного НРБ-99/2009 основного предела дозы для населения при нормальной эксплуатации источников ионизирующего излучения, разработанная

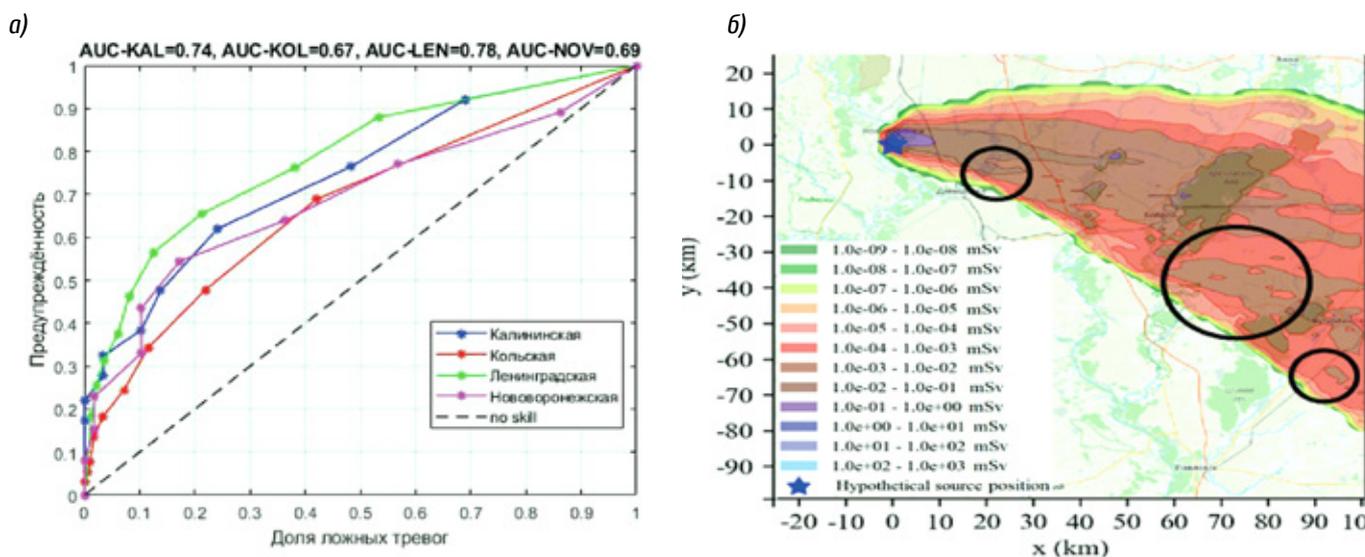


Рис. 2.3.1 — ROC-кривая, характеризующая качество вероятностного прогноза метеорологических полей (а) и картограмма прогнозируемых параметров радиационной обстановки для гипотетического сценария выброса с учетом улучшенных моделей описания взаимодействия с подстилающей поверхностью (б)

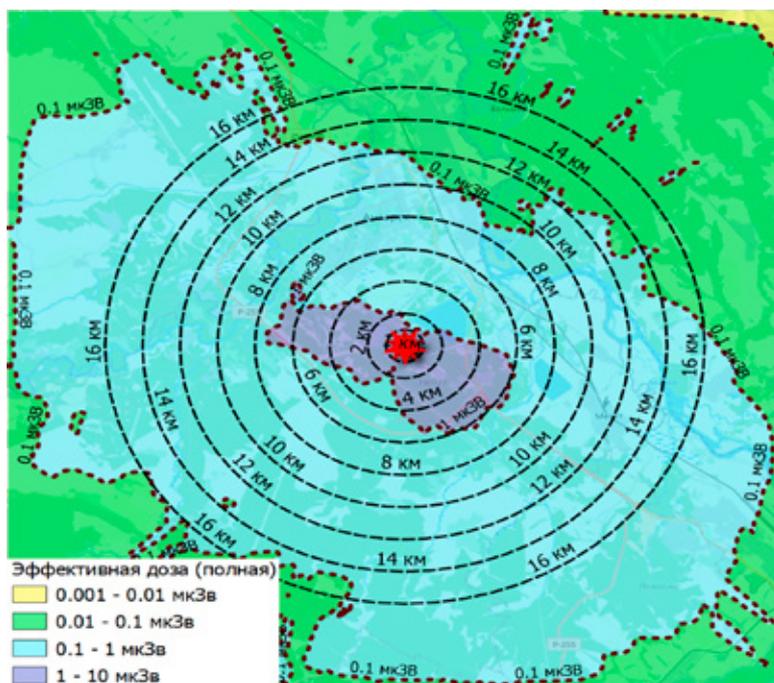


Рис. 2.3.2 – Прогноз возможного распределения среднегодовой полной эффективной дозы облучения населения на возрастную группу «дети 12–17 лет» для сценария демонтажа здания длительностью 3 года, мкЗв

методология открывает возможности углубленного исследования возможного радиационного воздействия на население и позволяет настраивать производственный процесс с точки зрения совершенствования методов резки, методов пылеподавления, способов хранения мусора и отходов и т.д., минимизируя дозовые нагрузки на население.

3. Разработка малогабаритного автономного дозиметра гамма-излучения для беспилотного летательного аппарата на основе сцинтилляционного детектора (Антоний Е.В., Гаврилов С.Л., Гайдуков В.В., Исаев А.Б., Шикин С.А.)

В 2021 году продолжились работы по разработке малогабаритного автономного дозиметра гамма-излучения для БПЛА. В 2021 году был разработан контроллер (рис. 2.3.3), обеспечивающий:

- подключение и работу сцинтилляционного детектора;
- собственный радиоканал для передачи данных на наземную станцию;
- получение географических координат от спутников ГЛОНАСС/GPS;
- подключение и работу барометрического датчика для определения высоты, на которой происходит измерение;
- автономное электропитание устройства;
- подключение устройства к компьютеру с использованием стандартных интерфейсов.

Выполнено макетирование устройства. Для выполнения макетирования устройства была разработана и напечатана на 3D принтере модель корпуса (рис. 2.3.4).

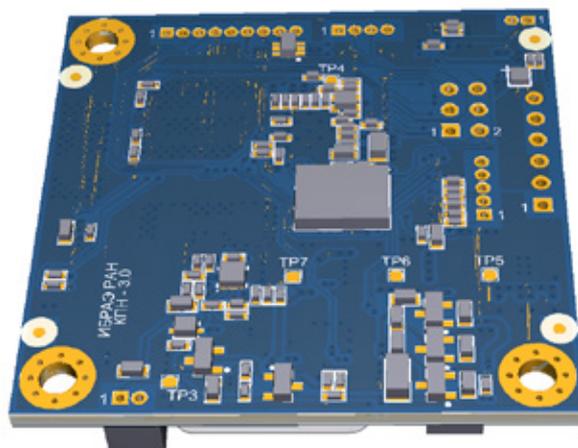
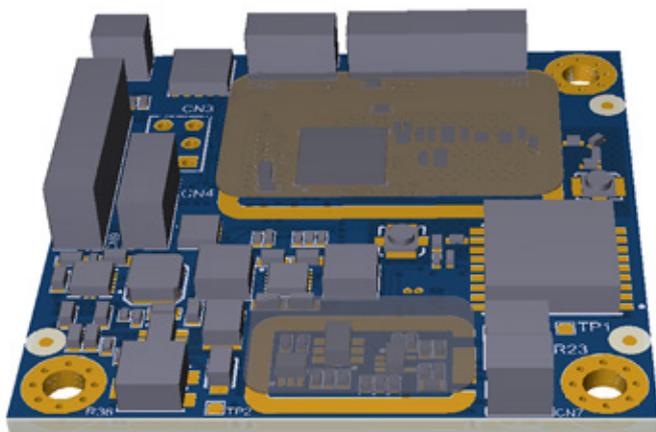


Рис. 2.3.3 – Внешний вид платы контроллера

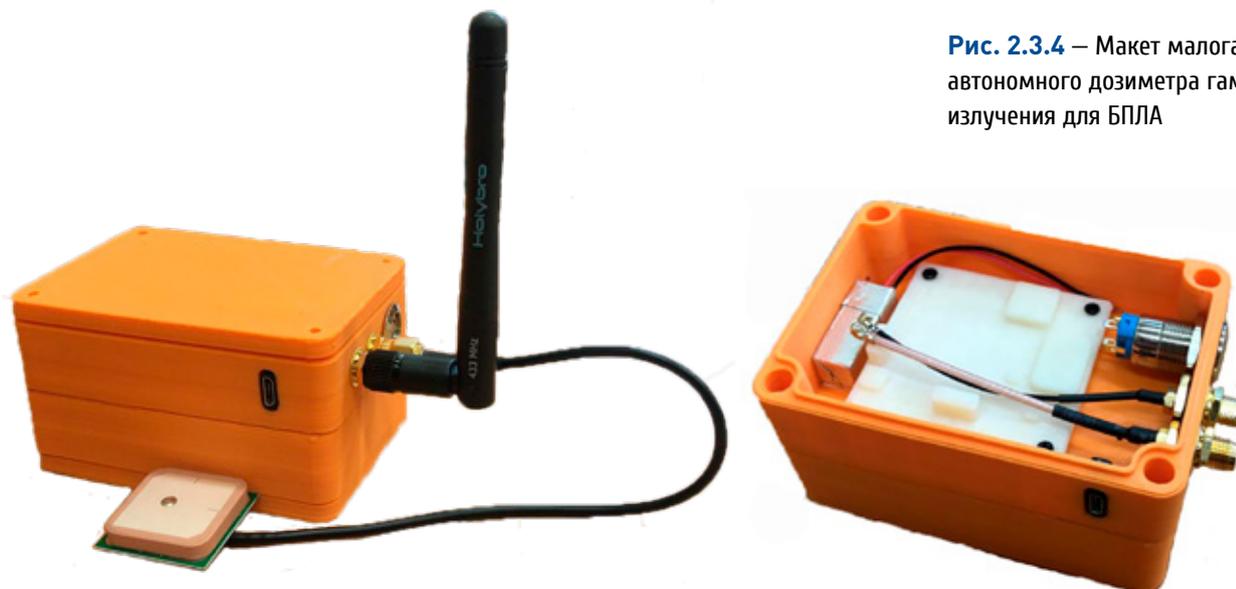


Рис. 2.3.4 – Макет малогабаритного автономного дозиметра гамма-излучения для БПЛА

По результатам макетирования была подготовлена документация для изготовления электронной платы контроллера и корпуса устройства. Работы будут продолжены в 2022 г.

4. Разработка быстроразворачиваемой автоматизированной системы контроля радиационной обстановки (БР АСКРО) (Антоний Е. В., Гаврилов С. Л., Гайдуков В. В., Исаев А. Б., Шикин С. А.)

БР АСКРО состоит из автономных малогабаритных постов радиационного контроля (АМПРК), объединенных в единую радиосеть, реализованную с использованием технологии DigiXbee, а также ноутбука с установленным на него системным и специальным программным обеспечением.

Автономный пост радиационного контроля (АМПРК), используется для непрерывного радиационного контроля при выполнении работ по локализации аварий и ликвидации их последствий, для обеспечения безопасной работы персонала аварийно-спасательных формирований, а также для контроля эффективности выполняемых работ (рис. 2.3.5).

Краткие технические характеристики БР АСКРО:

- Диапазон энергий регистрируемого фотонного излучения — от 0,1 до 1,5 МэВ.
- Диапазон измеряемой МАЭД фотонного излучения — от 0,1 мкЗв/ч до 10 Зв/ч.
- Автономность блоков АМПРК при отключении питания от внешнего источника (при температуре окружающей среды +20°C) — не менее 14 суток.

Рабочие условия эксплуатации блоков АМПРК:

- диапазон температур — от -20°C до +50°C;
- предельное значение относительной влажности — 98% при +35°C;
- атмосферное давление — в диапазоне от 84,0 до 106,7 кПа;
- расстояние устойчивой радиовидимости между соседними блоками АМПРК — до 0,5 км.



Рис. 2.3.5 – Автономный малогабаритный пост радиационного контроля

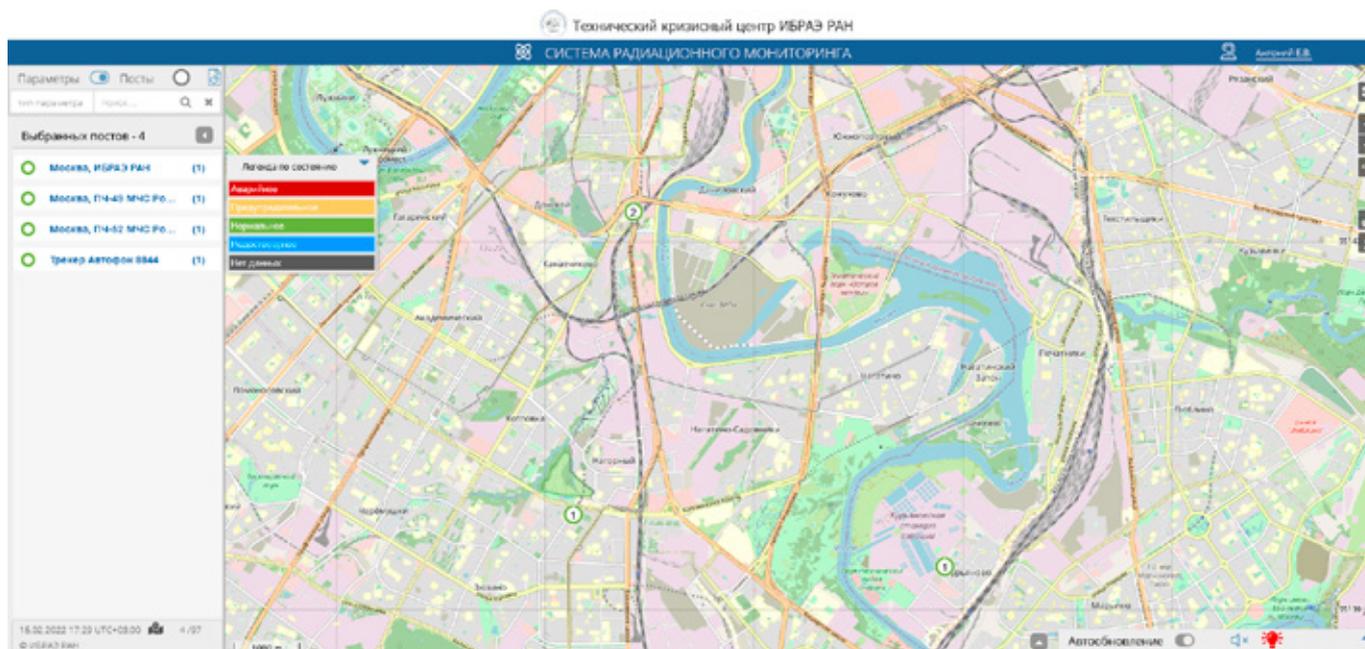


Рис. 2.3.6 – Программное обеспечение представления данных БР АСКРО

- Масса блока АМПРК — не более 3,8 кг.
- Габаритные размеры АМПРК — не более 250×295×175 мм.

В 2021 г. полностью завершили работы по созданию быстроразворачиваемой автоматизированной системы контроля радиационной обстановки (БР АСКРО). Завершающим этапом разработки стало внесение БР АСКРО в реестр средств измерения РФ (номер в реестре СИ № 83746-21).

5. Создание аварийно-технического центра Объединенного института ядерных исследований (Гаврилов С.Л., Шикин С.А., Антоний Е.В., Красноперов С.Н.)

В 2021 г. выполнен проект по созданию аварийно-технического центра Объединенного института ядерных исследований (г. Дубна).

В соответствии с регламентирующими документами для обеспечения готовности к реагированию на радиационные аварии в ОИЯИ должна функционировать система радиационного мониторинга и аварийного реагирования, функциональным ядром которой должен являться аварийно-технический центр, обеспечивающий круглосуточный контроль параметров технологической безопасности ядерно и радиационно-опасных объектов (ЯРОО) и радиационной безопасности персонала и населения за

счет применения стационарных и мобильных средств автоматизированных систем контроля радиационной обстановки.

Работы по созданию Аварийно-технического центра и автоматизированной системы контроля радиационной обстановки ОИЯИ выполняются в соответствии с ранее разработанным техническим проектом.

В состав АТЦ ОИЯИ входят следующие подсистемы:

- радиационного мониторинга;
- поддержки принятия решений;
- мониторинга основных параметров ИЯУ ИБР-2;
- коллективного просмотра;
- телефонной связи;
- гарантированного электроснабжения;
- контроля доступа;
- видеонаблюдения;
- серверная подсистема;
- локальная вычислительная сеть.

Все вышеперечисленные подсистемы уже введены в эксплуатацию и функционируют. Работы вступили в завершающую стадию создания АТЦ ОИЯИ, запланированную на 2022 г.

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)

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;
- ▶ ПРОБЛЕМ ВОДОРОДНОЙ ВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТИ, В ТОМ ЧИСЛЕ НА ОБЪЕКТАХ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ.

3 РАЗРАБОТКА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ АЛГОРИТМОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ ДЛЯ ЗАДАЧ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ГИДРОДИНАМИКИ

КЛЮЧЕВЫЕ СПЕЦИАЛИСТЫ

Д. Н. Токарчук — заместитель заведующего отделом (dan@ibrae.ac.ru);

О. С. Сороковикова, д.ф.-м.н., — зав. лабораторией суперкомпьютерного моделирования и программных комплексов (olga_sorokov@mail.ru);

Е. Ф. Митенкова, к.ф.-м.н. — зав. лабораторией нейтронно-физических расчетов (mit@ibrae.ac.ru);

А. А. Канаев, к.ф.-м.н. — зав. лабораторией математических алгоритмов и суперкомпьютерных технологий моделирования многофазных многокомпонентных турбулентных течений;

А. В. Соловьев, к.ф.-м.н., в.н.с. — моделирование турбулентных течений, вычислительная океанология, разработка компьютерных кодов (solovjev@ibrae.ac.ru);

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

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

А. И. Гавриков, к.ф.-м.н., с.н.с. — проведение математических расчетов по тематике водородной безопасности;

Д. Г. Асфандияров, к.ф.-м.н., м.н.с. — математическое моделирование течений в водных объектах;

Д. В. Дзама, м.н.с. — математическое моделирование течений в акваториях разного масштаба и переноса радиоактивных загрязнений, в том числе в донных отложениях.

ОСНОВНЫЕ ИТОГИ 2021 ГОДА

1. Обеспечение водородной взрывобезопасности

- В ПрЭВМ **CABARET-SC1**, с помощью которой проводились расчеты горения бедных водородно-воздушных смесей [1], **включена расчетная модель детонационных процессов в водородосодержащих смесях с однородным и неоднородным составом**. С помощью данного кода выполнено моделирование эксперимента по ускоренному горению 25.5% сухой водородно-воздушной смеси при нормальных условиях, ранее проведенного на установке РУТ, схема и габариты которой представлены на рис. 2.4.1. Расчет хорошо воспроизводит экспериментальные характеристики детонационной волны — показания датчиков давления и скорость детонационной волны вдоль длины установки, что и продемонстрировано на рис. 2.4.2.
- Проведено расширение функционала ПрЭВМ CABARET-SC1 путем **включения расчетной модели диффузионного горения**. В качестве модели турбулентного диффузионного горения была выбрана модель диссипации вихрей (eddy dissipation model, EDM), основанная на

предположении о том, что скорость химических реакций высока настолько, что общая скорость горения контролируется более медленным процессом — турбулентным смешением топлива и окислителя.

- Проведено расширение функционала ПрЭВМ CABARET-SC1 путем **включения расчетной модели термического излучения**. В качестве модели термического излучения был выбран конечно-объемный метод дискретных ординат (FVDOM). В этом методе все пространство направлений разбивается на ряд дискретных телесных углов, в каждом из которых интенсивность излучения равна среднему по этому углу значению. Методика КАБАРЕ была обобщена для решения полученных методом FVDOM уравнений переноса излучения по каждому дискретному направлению.
- Применение модели диффузионного горения в совокупности с моделью лучистого теплообмена позволило провести в вихреразрешающем приближении с помощью ПрЭВМ CABARET-SC1 моделирование эксперимента по изучению характеристик турбулентного диффузионного водородного пламени, прове-

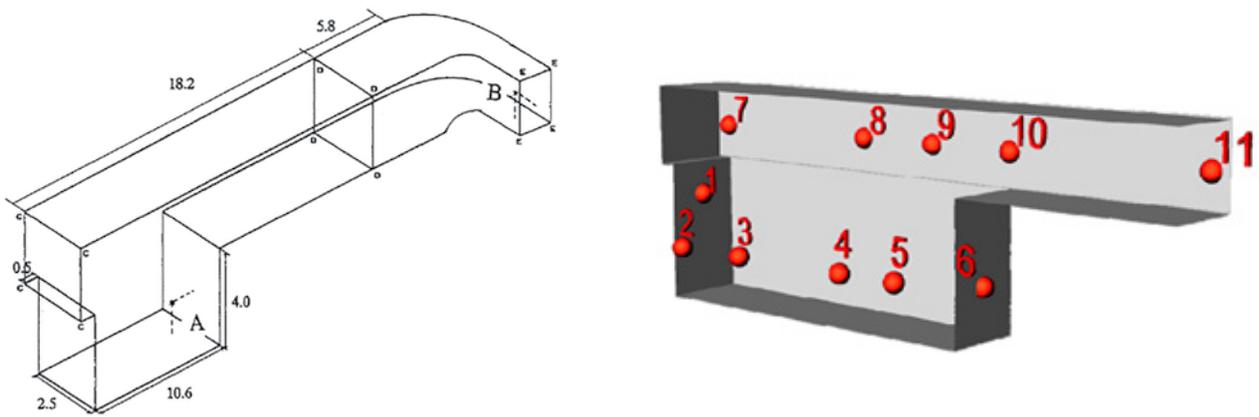


Рис. 2.4.1 – Схема и габариты установки РУТ, схема размещения датчиков давления

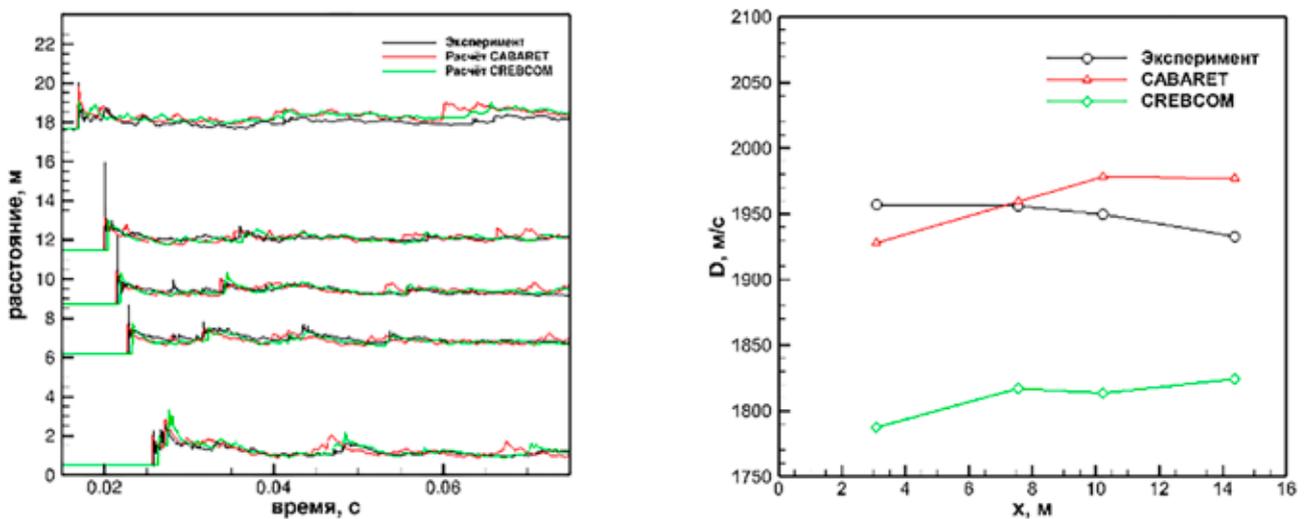


Рис. 2.4.2 – Сравнение показаний датчиков давления 7, 8, 9, 10, 11 для эксперимента и расчёта по CABARET-SCI

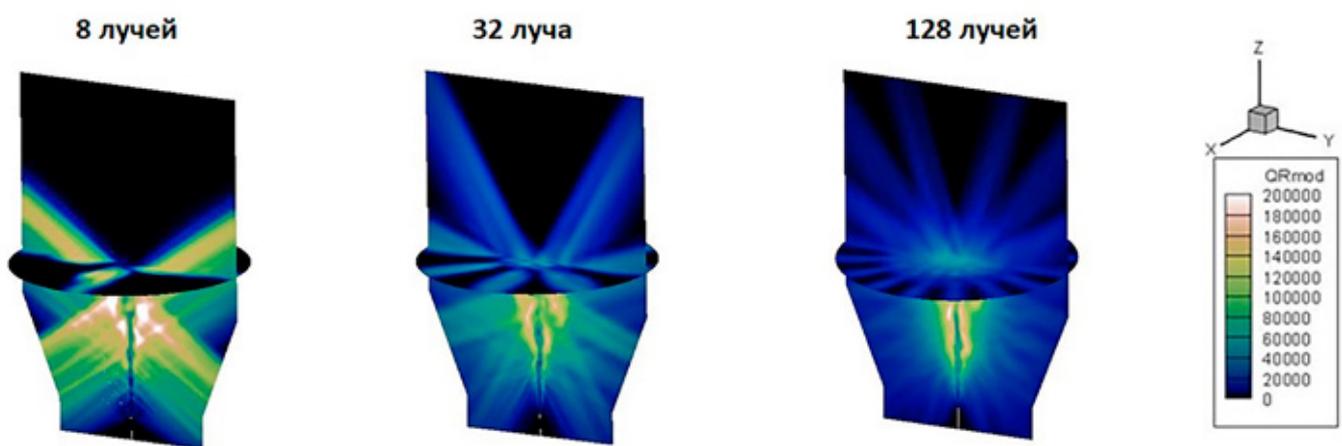


Рис. 2.4.3 – Радиационный тепловой поток от горячей водородной струи в расчетах с различным количеством лучей в методе FVDOM

денного сотрудниками Национальной лаборатории Сандия (Sandia National Laboratories, США). Получено хорошее соответствие результатов расчета экспериментальным дан-

ным и эмпирическим корреляциям по видимой длине факела, доле тепла, рассеиваемой излучением, профилю нормированного теплового потока (рис. 2.4.3, 2.4.4).

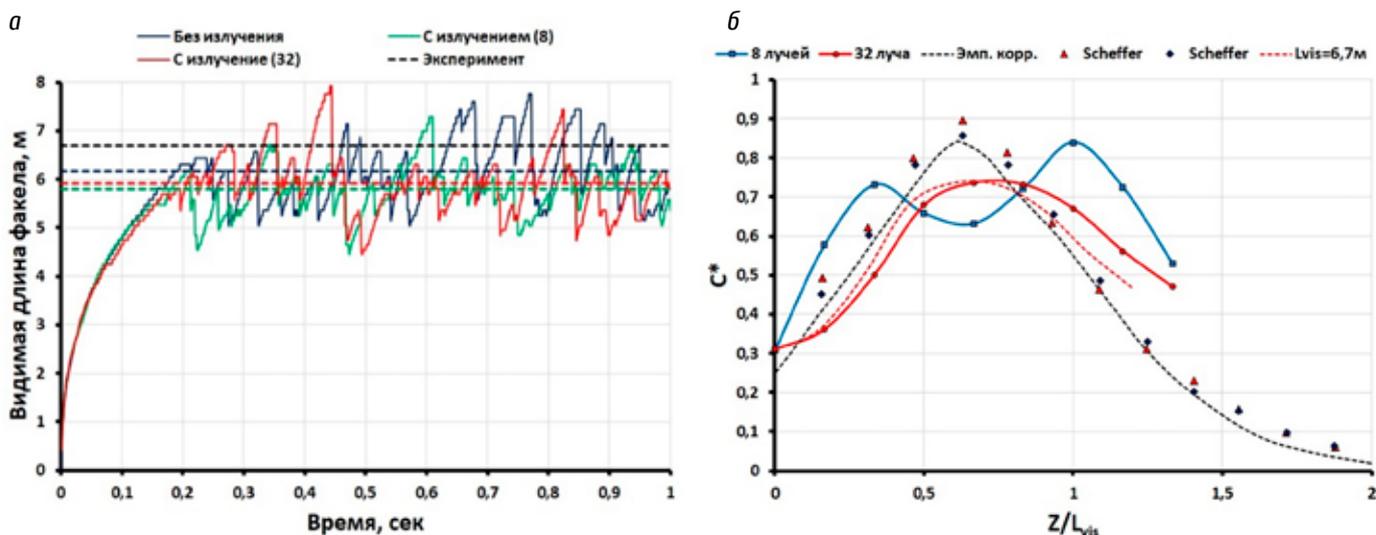


Рис. 2.4.4 – (а) видимая длина пламени в водородной пожар-струе. Сравнение расчетов с использованием модели излучения и без нее с экспериментом; (б) безразмерный профиль радиационного теплового потока. Показана сходимость результатов расчетов к экспериментальным данным при увеличении количества лучей в методе FVDM

2. Моделирование нестационарных течений неоднородной среды со свободной поверхностью

В рамках совершенствования расчетных схем для моделирования нестационарных течений неоднородной среды со свободной поверхностью проведено детальное сравнение результатов расчета на модельной задаче схлопывания однородного по плотности пятна в стратифицированной жидкости [3].

Рассмотрены две модели задачи схлопывания пятна: в случае однородного по плотности пятна, расположенного в резко стратифицированной среде, и в случае однородного по солености пятна в стратифицированной по солености морской воде. Сравнение полученных результатов проводилось с фиксированными числами Фруда и числами Рейнольдса. Случай однородного пятна, расположенного внутри вязкой стратифицированной по плотности среды, решался методом КАБАРЕ. Случай с диффузией солености внутри стратифицированной по солености среды решался методом МЕРАНЖ. В методе МЕРАНЖ расчетная область составляет половину реальной геометрии: она разделена вертикальной плоскостью $X = 0$, определяемой как граничное условие симметрии. Сравнимаемыми величинами были размеры пятна по горизонтали и вертикали, зависящие от времени.

Как видно из графика зависимости вертикального размера пятна (рис. 2.4.5а), верхний и нижний размеры динамически различаются из-за появления выталкивающей силы. Горизонталь-

ный размер пятна (рис. 2.4.5б) хорошо коррелирует с теоретической оценкой размера пятна.

Можно сделать вывод, что оба рассмотренных метода находятся в достаточном согласии с работами других авторов, занимающихся этой задачей.

3. Разработка программных средств по моделированию аварийного переноса радионуклидов в водных средах

Создана новая версия программного комплекса **CADAM**. Программный комплекс соответствует требованиям МАГАТЭ, предъявляемым к современным программным средствам и комплексам для организации и поддержки процесса мониторинга состояния водных объектов любого типа, от локальных поверхностных водоемов до крупных морских акваторий.

Одним из основных направлений разработок этого года было доведение программного продукта до уровня, когда возможно отчуждение от разработчиков и передача его в использование на практике. Были разработаны обучающие материалы, учебник, комплекс практических заданий для специалистов атомной отрасли. Проведено обучение представителей предприятий и организаций. Обучением, а затем тестированием навыков по теоретическим основам и используемым методологиям, особенностям программной реализации было охвачено более двадцати специалистов. Новая версия CADAM, документация на нее оформлена заявкой на РИД.

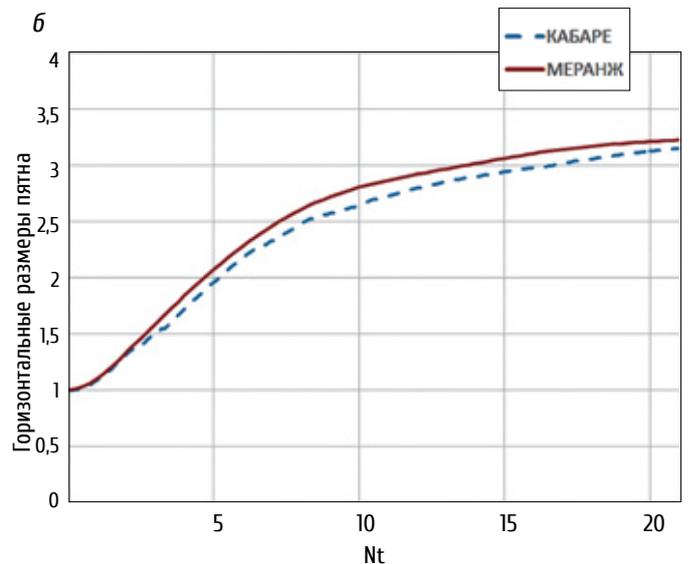
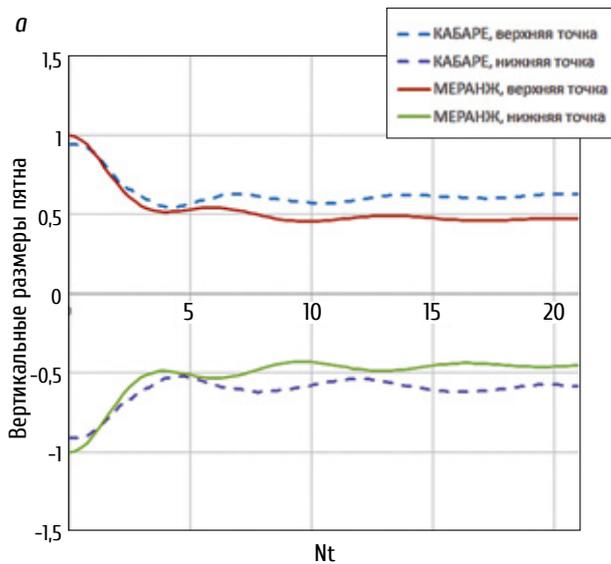


Рис. 2.4.5 – (а) зависимость вертикального размера пятна от времени. Расчетная область в методе КАБАРЕ $[-15;15] \times [-5;5]$, сетка 300×100 ; расчетная область в методе МЕРАНЖ $[0;15] \times [-5;5]$, сетка 150×100 ;
 (б) зависимость горизонтального размера пятна от времени. Расчетная область в методе КАБАРЕ $[-15;15] \times [-5;5]$, сетка 300×100 ;
 расчетная область в методе МЕРАНЖ $[0;15] \times [-5;5]$, сетка 150×100

Среди особенностей новой версии CADAM отметим, что прогнозы, моделирование последствий аварийных загрязнений могут быть проведен на любом уровне детализации ситуации. Можно сделать первичные грубые оценки на основе действующих рекомендаций МАГАТЭ. А можно сделать детальные уточненные оценки на основе трехмерных моделей конкретного водного объекта с учетом широкого круга факторов с учетом гидродинамики течений. Самые наукоемкие разработки доведены до возможности практического использования сторонними пользователями. Результатами моделирования являются в том числе

и дозовые нагрузки на население про разных видах водопользования.

Создана вспомогательная автоматизированная система построения трехмерных объектов разного типа на основе специфических баз данных, включенных в программный комплекс. На рис. 2.4.6 представлена визуализация трехмерного фрагмента дна и прилегающей территории южной части Кольского залива для моделирования гидродинамики и процессов распространения радиоактивного загрязнения от гипотетической аварии. На рис. 2.4.7 представлена визуализация параметров течения Кольского залива.

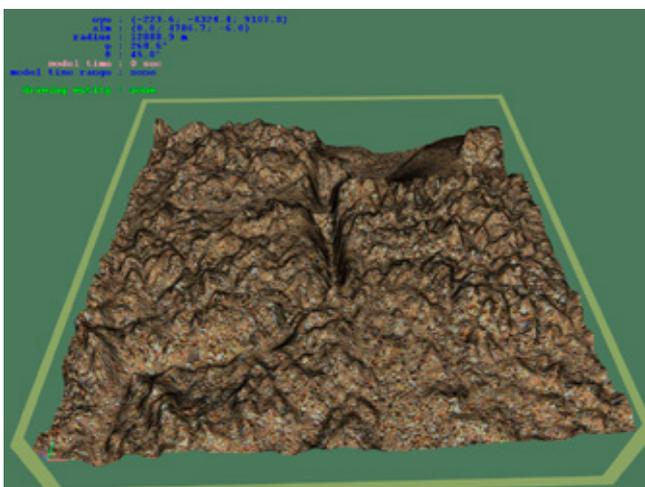


Рис. 2.4.6 – Трехмерная модель Кольского залива и окружающих территорий

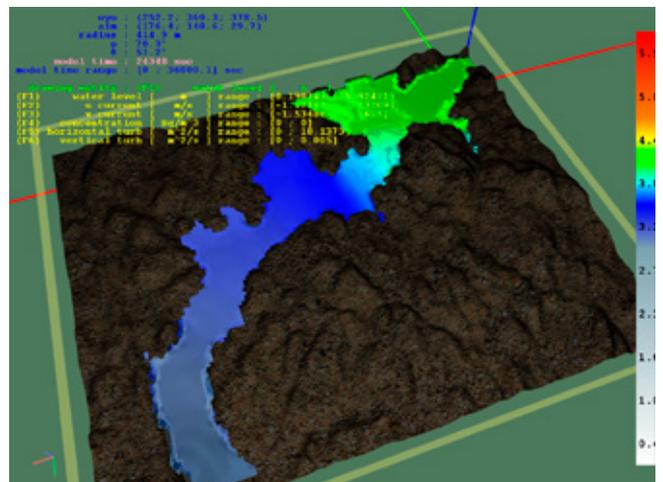


Рис. 2.4.7 – Модельное течение. Кольский залив

Проведена комплексная верификация новой версии интегрированного комплекса, в том числе с привлечением сторонних специалистов. Расширена матрица валидации отдельных модулей.

4. Разработка программного обеспечения для задач оперативной океанологии

Задачи оперативной океанологии в зависимости от требований, предъявляемых к результатам, могут решаться в различной постановке. В тех случаях, когда фактор времени является существенным, традиционным является применение приближения мелкой воды, когда не учитывается изменение скорости течения по глубине. Полная система уравнений гидродинамики в этом случае сводится к более простой системе уравнений Сен-Венана. Эта система уравнений является гиперболической, для ее решения целесообразно использовать ранее разработанную в ИБРАЭ РАН балансно-характеристическую схему КАБАРЕ, обладающую вторым порядком аппроксимации, имеющую малую диссипацию и хорошие дисперсионные свойства.

Указанные свойства схемы КАБАРЕ в полной мере проявляются на прямоугольных расчетных сетках. Использование прямоугольных расчетных сеток также является привлекательным и с точки зрения эффективности счета. Время расчета одного шага при использовании таких сеток в разы меньше времени расчета шага при применении криволинейных неструктурированных сеток. С другой стороны, изрезанность береговой линии и целесообразность дополнительного измельчения сетки в районе резкого изменения батиметрии или в районе особенности течения затрудняют использование прямоугольных сеток.

Одним из возможных решений, позволяющих разрешить это противоречие, является применение квадросеток. Квадросетки, с одной сто-

роны, состоят из прямоугольных ячеек. С другой стороны, возможность разбиения (в том числе многократного) любой ячейки на 4 вдвое меньшие ячейки дает требуемую возможность гибкого управления размерами ячеек. Для достижения требуемого результата в ИБРАЭ РАН разработан и реализован алгоритм построения квадросеток, управляемый сценариями, состоящими из команд, задающих уровни деления первоначальной базовой сетки в требуемых областях. Например, на рис. 2.4.8 приведена квадросетка, примененная для более точного воспроизведения береговой линии Соловецких островов Белого моря.

Для таких квадросеток построена разностная схема класса КАБАРЕ, предназначенная для решения системы уравнений мелкой воды. Построенная схема применена нами для моделирования приливной динамики Белого моря (рис. 2.4.9).

5. Проведение прецизионных нейтронно-физических расчетов

Для решения задач нуклидной кинетики:

- Разработаны прецизионные модели для расчета на полной базе ядерно-физических данных с короткоживущими и долгоживущими элементами, использованием всех элементов продуктов деления с независимыми выходами, с дополнительными реакциями в цепочках переходов, включая высокопороговые (n,d) , (n,t) , $(n,3n)$, $(n,2\alpha)$, (n,nd) , (n,np) , $(n,2n\alpha)$, $(n,2nd)$, $(n,2p)$, $(n,p\alpha)$ и др.
- Для решения жестких систем обыкновенных дифференциальных уравнений большой размерности разработана программа MZK [7], базирующаяся на сверхточных решателях библиотеки SADEL (МГТУ им. Н.Э. Баумана). Программа MZK обеспечивает вычисление переменных до 10—50 (удельные единицы при значениях до 10—25 для базовых нукли-

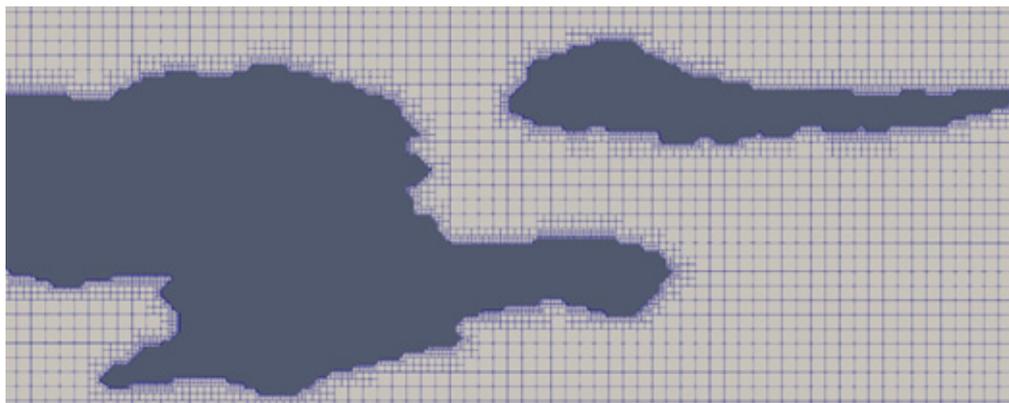


Рис. 2.4.8 – Пример построения квадросетки для более точного отслеживания береговой линии

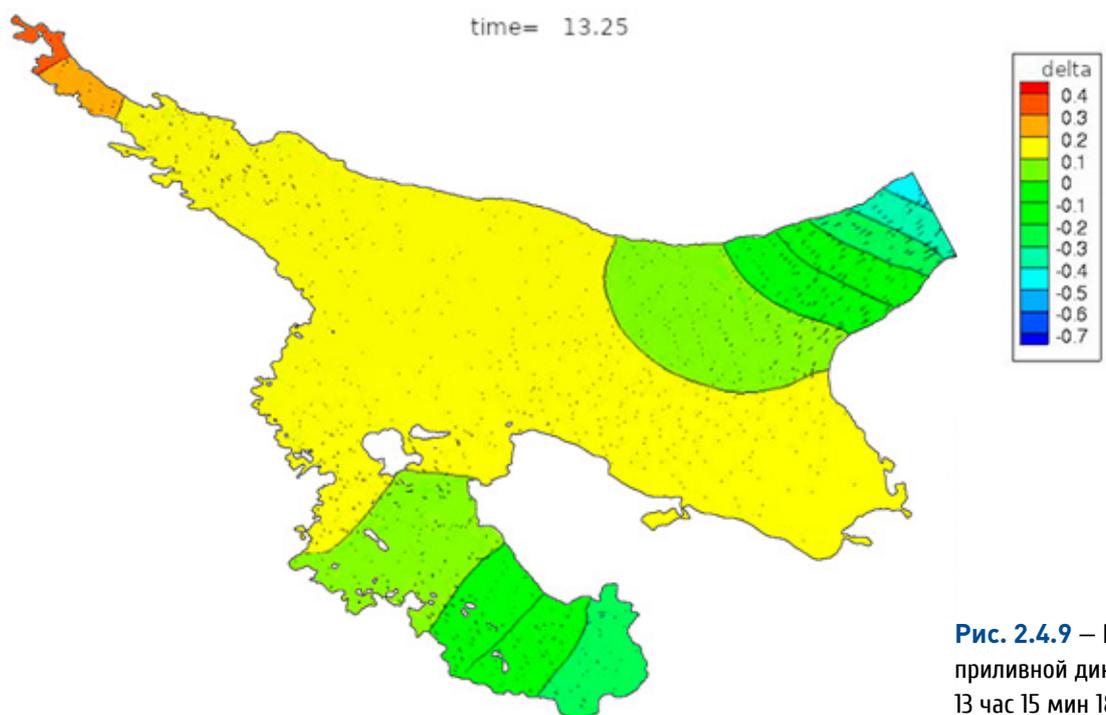


Рис. 2.4.9 – Пример моделирования приливной динамики Белого моря на 13 час 15 мин 18 мая 2005 года

дов) с гарантированной точностью, подтверждая устойчивость решений для всех вычисляемых элементов на всем временном интервале облучения ($T_{обл}$) — от секунд до сотен суток (задачи активации) и от нескольких часов до 1000 сут и более. Это особенно актуально в отсутствие точных аналитических решений и экспериментальных данных для большей части нуклидов. Сравнительные расчеты ну-

клюдного состава по MZK и MATLAB для жестких систем приводят к совпадающим результатам в пределах заданной погрешности для большей части нуклидов. Вместе с тем в отличие от MZK в MATLAB для некоторых нуклидов наблюдается колебательный характер решений, корректировка которого возможна при априорном знании точного аналитического решения.

КЛЮЧЕВЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАБОТ

1. Gavrikov A., Golub V. V., Volodin V., Mikushkin A. Yu., Danilin A. V. Buoyant flames in near the lower flammability limit hydrogen–air mixtures // *Journal of Physics Conference Series*, – 2021. February.— 1787(1):012018.
2. Toliás I., Kanaev C., Koutsourakis A. A., Glotov V. Y., Venetsanos A. G. Large Eddy Simulation of low Reynolds number turbulent hydrogen jets – Modelling considerations and comparison with detailed experiments // *International Journal Of Hydrogen Energy*. – 2021. – Т. 46. – Вып. 23.
3. Gushchin V. A., Kondakov V. G., Smirnova I. A. Mathematical Modeling of Wave Motions of Fluids // *Applied Mathematics and Computational Mechanics for Smart Applications: Proceedings of AMMAI 2020*. – 2021. – Т. 217. – С. 35.
4. Афанасьев Н. А., Головизнин В. М., Соловьев А. В. Схема КАБАРЕ с улучшенными дисперсионными свойствами для систем линейных дифференциальных уравнений гиперболического типа / *Вычислительные методы и программирование*. – 2021. – Т. 22, – № 1. – С. 67–76.
5. Головизнин В. М., Соловьев А. В., Диссипативные и дисперсионные свойства разностных схем для линейного уравнения переноса на меташаблоне / *Математическое моделирование*. – 2021. – Т. 33. – № 6. – С. 45–58.
6. Головизнин В. М., Майоров П. А., Майоров П. А., Соловьев А. В. Валидация модели CABARET-MFSH на эксперименте по исследованию гравитационного течения вдоль границы раздела двухслойной жидкости // *Ломоносовские чтения. научная конференция: тезисы докладов*. – М.: МАКС Пресс, 2021. – С. 62–63.
7. Митенкова Е. Ф., Соловьева Е. В., Маничев В. Б., Кожевников Д. Ю. Программа MZK для решения жестких систем в задачах нуклидной кинетики / *Атомная Энергия*. – 2021. – Т. 130. – Вып. 6. – С. 323–326.



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 в приложении к неклассическим процессам переноса примесей в неоднородных средах; электронным и колебательным спектрам фуллеренов; закономерностям окисления ATF-оболочек, включая циркониевые оболочки с хромовым напылением;

Ю. Н. Обухов, к.ф.-м.н. — новые методы и математические модели для решения проблем безопасного использования атомной и термоядерной энергии, инновационных ядерных технологий на основе фундаментальных исследований физических явлений, процессов и материалов;

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 МЕТОДОМ САМОПОГРУЖЕНИЯ
- 3 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ И ФОНОННЫХ СПЕКТРОВ ИСПУСКАНИЯ И ПОГЛОЩЕНИЯ, А ТАКЖЕ СЕЧЕНИЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ (ИОНИЗАЦИЯ, ВОЗБУЖДЕНИЕ, ФОТОИОНИЗАЦИЯ, РЕКОМБИНАЦИЯ, ФОТОПОГЛОЩЕНИЕ И Т. Д. ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРОННОГО УДАРА И ИЗЛУЧЕНИЯ) НЕЙТРАЛЬНЫХ И ЗАРЯЖЕННЫХ ФУЛЛЕРЕНОВ C_{60} , C_{240} И ЛУКОВИЧНОГО ФУЛЛЕРЕНА $C_{60}@C_{240}$
- 4 РАЗРАБОТКА АНАЛИТИЧЕСКИХ И ЧИСЛЕННЫХ МОДЕЛЕЙ ОКИСЛЕНИЯ НОВЫХ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ATF-ОБОЛОЧЕК ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ, ВКЛЮЧАЯ ЦИРКОНИЕВУЮ ОБОЛОЧКУ С ХРОМОВЫМ НАПЫЛЕНИЕМ
- 5 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.
- 6 НОВЫЙ ПОДХОД К ТЕОРИИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ, ПРИНИМАЮЩИЙ ВО ВНИМАНИЕ ГРАВИТАЦИОННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ
- 7 ПРОБЛЕМЫ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

ОСНОВНЫЕ ИТОГИ 2021 ГОДА

1. Неклассические процессы переноса

Разработана асимптотическая теория классической анизотропной диффузии в неоднородных средах. При выводе использован формализм дифференциальной геометрии, заимствованный из общей теории относительности. Получена простая аналитическая формула для концентрации, элементами которой являются линейные интегралы вдоль геодезической траектории концентрационного сигнала. Сама траектория вытекает из вариационного принципа, которому удовлетворяет показатель экспоненты в выражении для концентрации, и определяется из обыкновенного дифференциального уравнения первого порядка для вектора, касательного к геодезической линии. Теория справедлива на расстояниях от источника примеси, значительно превосходящих размер основной области ее локализации.

Развита асимптотическая теория переноса примеси в простейшей регулярно-неоднородной среде — модели Дыхне, демонстрирующей субдиффузионный транспортный режим, с параметрами, испытывающими крупномасштабные пространственные зависимости. Результаты для концентрации на расстояниях от источника примеси, значительно превосходящих размер основной области ее локализации, выражаются через линейные интегралы вдоль траекторий концентрационных сигналов. Эти траектории получаются из вариационного принципа, который является аналогом принципа Ферма в геометрической оптике. Интегралы вдоль траекторий представляют собой аналоги длины оптического пути. Вид интегралов зависит от режима переноса, а траектории в зависимости от режима могут быть как плоскими, так и трехмерными кривыми.

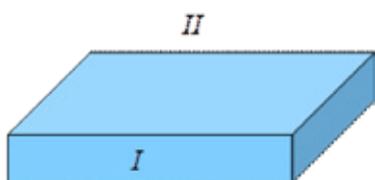


Рис. 2.4.10 — Геометрия задачи: I — трещина, II — матрица

Проанализированы неклассические режимы переноса примеси в статистически однородной резко контрастной среде в присутствии одиночной крупномасштабной неоднородности в форме адвективного канала. В основной среде на

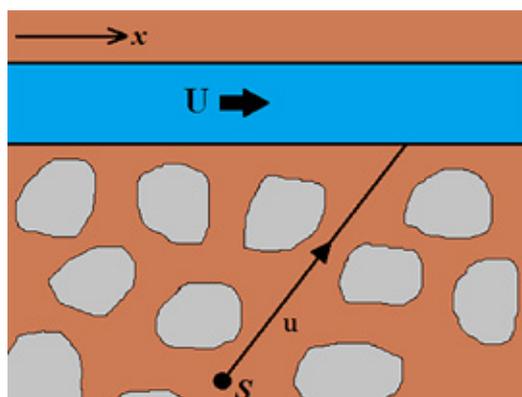


Рис. 2.4.11 — Геометрия задачи: S — источник примеси, u — скорость адвекции в основной среде

пути от источника примеси к каналу реализуются различные режимы переноса (классические и неклассические), включая быструю и медленную адвекцию–диффузию, квазидиффузию и субдиффузию. Распределение концентрации в канале состоит из экспоненциально малого многоступенчатого предвестника и основного концентрационного сигнала, форма и длительность которого зависят от соотношения между характеристиками основной среды.

2. Разработка математической модели поведения газожидкостных включений в галитах под действием высоких градиентов температуры для решения задач по изоляции радиоактивных отходов

Изоляция радиоактивных отходов (РАО) и отработанного ядерного топлива (ОЯТ) в галитах имеет специфику, обусловленную наличием жидкостных включений. Эти включения с рассолом могут мигрировать в поле градиента температуры к источнику тепла. Опасность состоит в том, что наличие рассола в области захоронения РАО создаст агрессивную среду, которая приведет к ускоренному разрушению инженерных барьеров безопасности.

В работе рассматривается микроскопическая модель эволюции жидкого включения в поле градиента температуры с учетом поверхностных явлений. Учет этих явлений позволяет моделировать изменение формы включения в ходе миграции.

Разработан программный комплекс для численной реализации разработанной модели, основанной на методе конечных элементов на подвижной адаптивной сетке в программной среде FEniCS. Проведены расчеты, описыва-

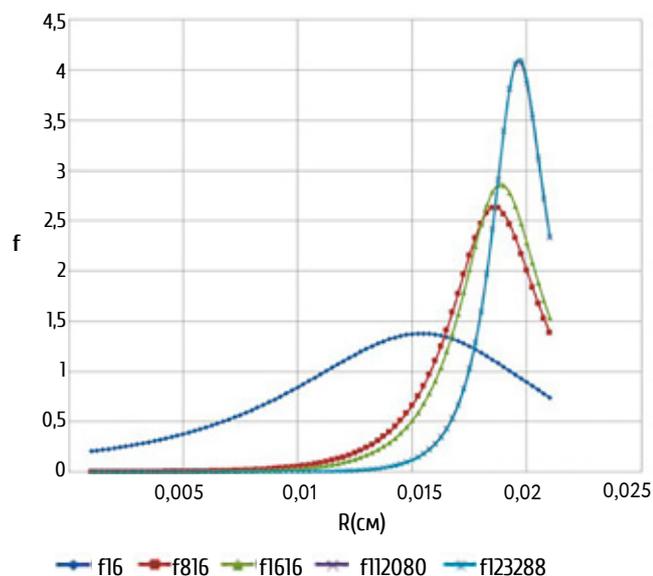


Рис. 2.4.12 – Функция распределения газожидкостных включений по размерам в различные моменты времени

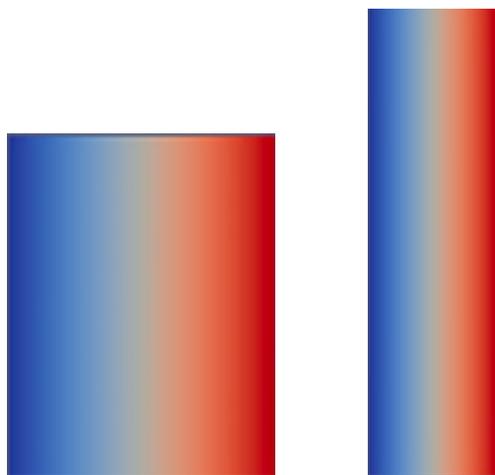


Рис. 2.4.13 – Изменение формы включения в начале процесса миграции до устойчивого состояния

ющие результаты экспериментальных исследований, известных в литературе (рис. 2.4.12, 2.4.13). Сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными показали их хорошее совпадение.

Полученные результаты являются практически важными для обоснования надежности захоронений радиоактивных отходов в геологических средах.

3. Электронные и колебательные спектры заряженных фуллеренов

Создан численный код, позволяющий рассчитывать сечения процессов, динамику электронной функции распределения в ВЧ-разряде и спектры флуоресценции в ВЧ-разряде или при падении электронного пучка на газ из фуллеренов или их ионов.

На основании рассчитанных собственных волновых функций и их энергий с использованием DFT-кодов QuantumEspresso, ORCA и VASP исследовались такие характеристики, как пространственные зависимости волновых функций, электронной плотности, соответствующей квадрату амплитуды функций, орбитальных квантовых чисел (рис. 2.4.14) и т. д. Вычислены фоновые колебательные спектры фуллеренов, показана их роль в формировании спектров поглощения и испускания фуллеренов.

Проведен анализ устойчивости высоко-заряженных C_{240} и луковичных фуллеренов $C_{60}@C_{240}$. Аналитические оценки и расчетные данные с использованием квантово-механического кода QuantumEspresso показывают близкие величины для максимально достижимой степени ионизации этих наночастиц, хотя аналитические результаты все же несколько преувеличивают численные данные.

Кроме того, получены результаты расчетов сечений различных процессов с участием нейтральной молекулы фуллерена (или ее иона) при ее взаимодействии с потоком электронов или фотонов. Сечения взаимодействия включают в себя сечения неупругого рассеяния электронов на фуллерене, сечения ионизации фуллерена и его ионов электронным ударом, сечения фотоионизации и фотопоглощения фуллерена, а также сечения захвата электрона нейтральным фуллереном и ионом фуллерена. Также рассчитаны времена жизни свободных электронных уровней (рис. 2.4.15).

Для больших нейтральных молекул C_{240} , $C_{60}@C_{240}$ (рис. 2.4.14) и их ионов еще раз подтверждено, что наряду с обычными локализованными вблизи сферы фуллерена электронными уровнями (ПЛЭУ) существуют объемно-локализованные уровни (ОЛЭУ). Число ОЛЭУ невелико (как правило, их всего несколько), оно быстро растет с ростом степени ионизации фуллеренов.

Эти новые данные расширяют ранее полученные результаты в рамках подхода модельного потенциала на основе сферически-симметричного приближения, продемонстрировано существование объемно-локализованных электронных уровней (VLEL) ионов фуллерена C_{60}^{+Z} на основе более строгого подробного квантово-механического анализа фуллерена и его ионов с использованием кодов DFT Quantum Espresso, ORCA и VASP, теперь и для больших фуллеренов. Это очень убедительный новый результат, который подтверждает гипотезу о существовании VLEL в фуллерене и его ионах. Получены физические параметры VLEL и по-

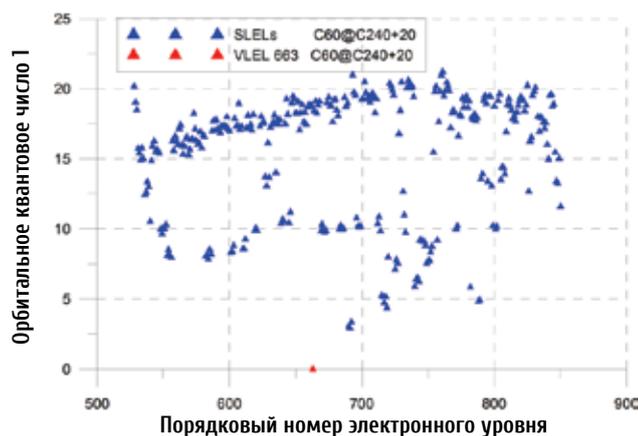
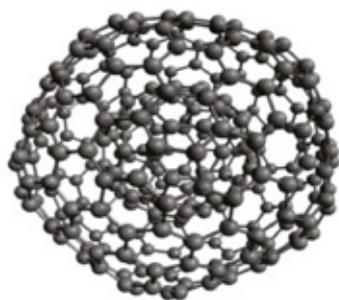


Рис. 2.4.14 – Оптимизированная форма большого фуллерена $C_{60}@C_{240}$ с зарядом $Z=+20e$ (слева) и зависимость орбитального квантового числа l от номера электронного уровня. Синие треугольники – ПЛЭУ (VLEL), красный треугольник – один ОЛЭУ с номером 663 (VLEL)



Рис. 2.4.15 – Времена жизни электронных незанятых состояний большого фуллерена $C_{60}@C_{240}$ с зарядом $Z=+20e$ в зависимости от номера уровня

верхностно-локализованных состояний (SLEL), включая поведение энергии и пространственной структуры (см. рис. 2.4.16). Чтобы проверить предсказательную способность используемых кодов DFT, было проведено сравнение результатов расчетов для нейтрального фуллерена и его ионов потенциала ионизации, а также сечений фотоионизации с экспериментальными данными, доступными в литературе. Установлено, что рассматриваемые коды DFT представляют собой мощные численные инструменты, которые могут быть успешно использованы для квантово-механического анализа таких сложных молекул, как фуллерены и их ионы. Были выбраны оптимальные варианты расчета и алгоритмы для каждого кода.

Обнаружено, что объемно-локализованные состояния в целом имеют гораздо более длительные времена жизни по сравнению с временами жизни поверхностно-локализованных состояний, что объясняется существенным отличием квантово-механических свойств VLEL от свойств SLEL вследствие их различной трехмерной геометрической структуры.

В результате подтверждены следующие особенности: (1) общее количество VLEL мало по сравнению с общим количеством SLEL, (2) ко-

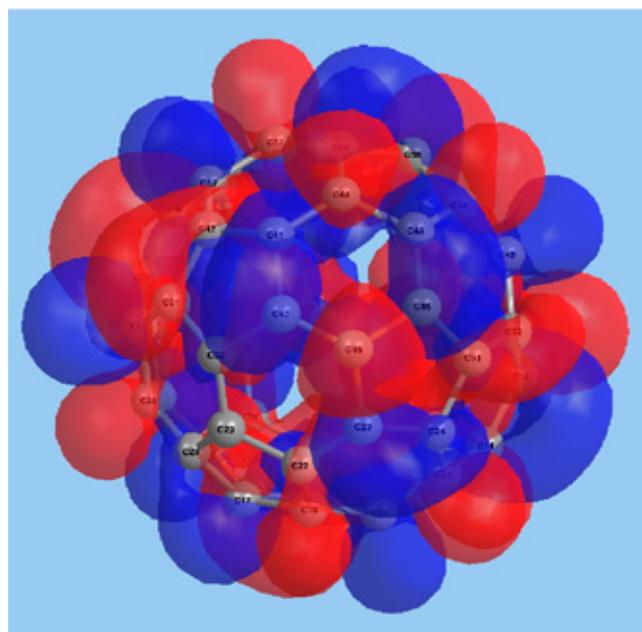


Рис. 2.4.16 – Трехмерная геометрическая структура изоповерхностей амплитуды волновой функции для электронного состояния положительно заряженного фуллерена C_{60}^{+3} с энергией $E = -8.691$ эВ. Изоповерхности построены для значений энергии: 0.02 (красный) и -0.02 (синий), используя код Quantum Espresso

личество VLEL растет с увеличением степени ионизации фуллерена, (3) орбитальное квантовое число VLEL (как правило, $l = 0, 1$ или 2) обычно намного меньше по сравнению с SLEL, (4) времена жизни VLEL существенно больше по сравнению с временами жизни SLEL. Уникальные свойства заряженных фуллеренов могут предложить новые интересные практические приложения.

4. Модель окисления ATF-оболочки из циркония с хромовым напылением

Описаны подходы к моделированию окисления перспективных ATF-оболочек на основе циркония с хромовым покрытием толщиной до 15—20 мкм. Анализ экспериментальных и аналитических результатов позволяет утверждать, что покрытия на основе Zr с хромовым покрытием обладают низкой кинетикой окисления в диапазоне температур $T=700—1300^{\circ}\text{C}$. Однако во время высокотемпературного окисления постепенно развиваются три последовательные фазы этого процесса, которые приводят к постепенному и значительному ухудшению характеристик окисления в процессе окисления (рис. 2.4.17). Была разработана специальная новая аналитическая модель окисления этих оболочек. Модель основана на решении уравнений диффузии кислорода (а в перспективе и с одновременным решением уравнений диффузии хрома и циркония) в многослойной системе Cr_2O_3 , Cr, CrZr_2 , ZrO_2 , $\alpha\text{-Zr(O)}$, $\beta\text{-Zr}$. Результаты демонстрируют хорошую предсказательную способность модели (рис. 2.4.18).

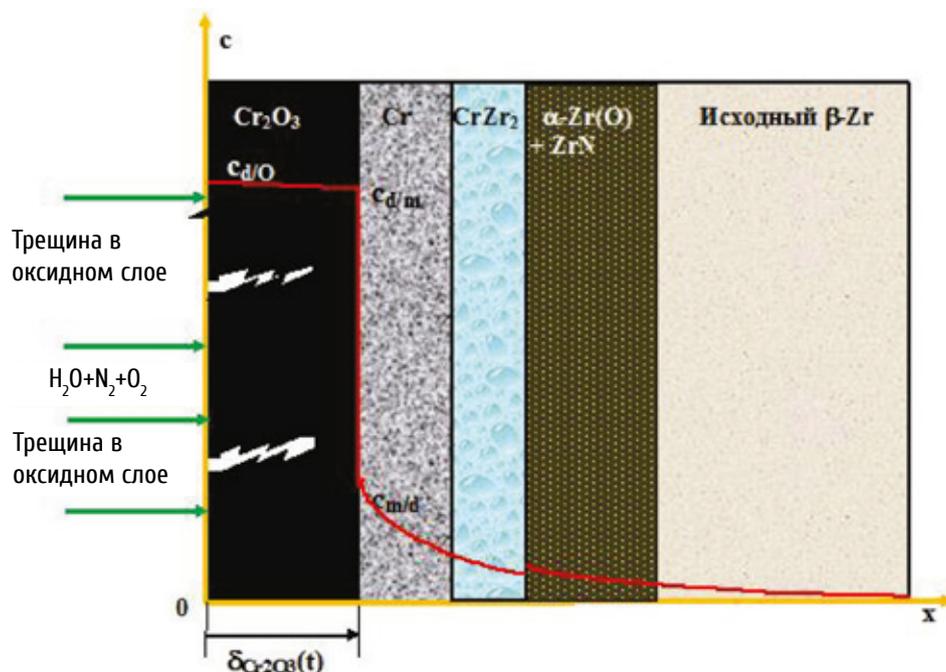


Рис. 2.4.17 — Профиль концентрации кислорода в слоях оболочки Zr/Cr на второй фазе ухудшения защитных свойств оболочки вследствие растрескивания оксида хрома, увеличения эффективного коэффициента переноса кислорода в оксиде хрома и металлическом хrome (вследствие образования в нем преципитатов диоксида циркония). Начинается формирование фазы альфа-циркония в исходной циркониевой фазе

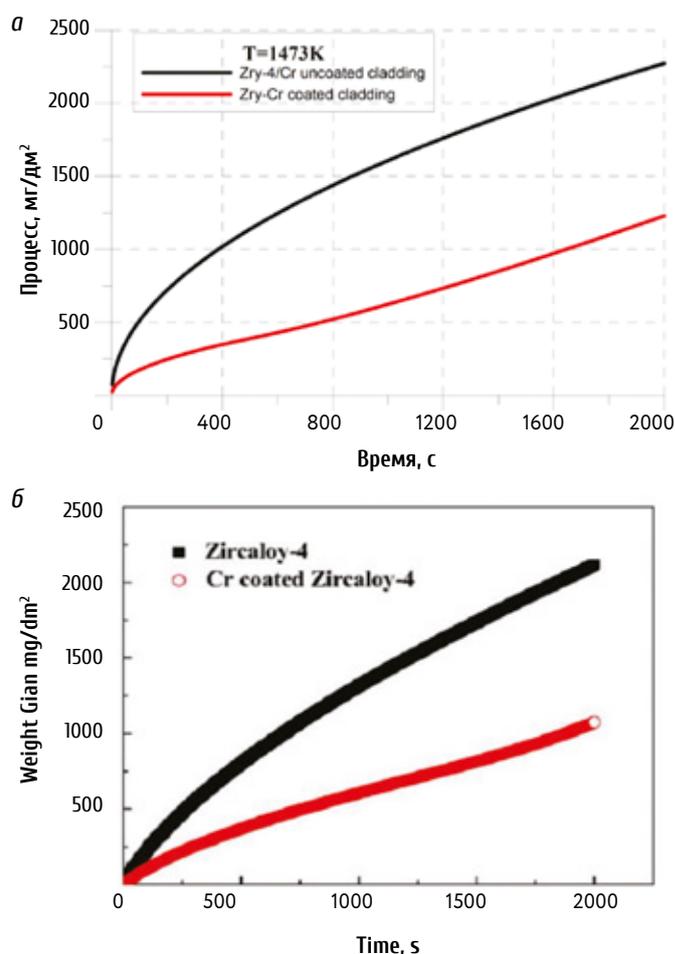


Рис. 2.4.18 — Сравнение расчетных результатов на основании разработанной модели окисления (а) с экспериментальными результатами из работы: Park J.-H., Kim H.-G., Park J.-Y. et al. High Temperature Steam-Oxidation Behavior of Arc Ion Plated Cr Coatings for Accident Tolerant Fuel Claddings. Surface & Coatings Technology, 2015, 280, pp. 256-259. Модель окисления ATF-оболочки из циркония с хромовым напылением

В целом применение оболочки на основе циркония ATF с хромовым покрытием в оболочках реакторов выглядит разумным вследствие появления запаса времени и возможности исключения перехода в тяжелоаварийную стадию и смягчения последствий запроектных аварий на АЭС. Таким образом, наибольший выигрыш от использования циркониевых оболочек с хромовым напылением ожидается для сценариев с диапазоном температур около 700—1200°C в рамках проектной аварии, и, соответственно, при этом ожидается низкая скорость генерации водорода. Разница в таких параметрах, как выделение химического тепла, скорость образования водорода и интегральная генерация водорода, может достигать одного порядка в пользу оболочек с хромовым покрытием по сравнению со стандартными циркониевыми оболочками.

5. Исследование спиновых, вращательных и киральных явлений в физических системах частиц с внутренней структурой во внешних полях

Изучение спиновых, вращательных и киральных явлений (а также их взаимное влияние друг на друга) имеет фундаментальное значение в астрофизике, физике высоких энергий и столкновениях тяжелых ионов. Основные результаты исследований состоят в следующем:

- Дан оригинальный вывод уравнений квантовой гидродинамики, которые согласуются с существующими моделями, на основе коллективной динамики отдельных частиц, описываемой микроскопическим многочастичным уравнением Шредингера. Исходя из многочастичного уравнения Шредингера построена модель квантовой жидкости для бозе-эйнштейновского конденсата (БЭК) нейтральных атомов со спином 1, которая учитывает возможные спин-спиновые и короткодействующие взаимодействия, когда диапазон межчастичных взаимодействий сравним с радиусом бозонов. Найдено полное описание динамики жидкости для БЭК спина 1 системой уравнений, которая включает уравнение неразрывности, уравнение баланса импульса и уравнение эволюции плотности спина. Показано, что существенный вклад в уравнение баланса импульса дают силовые поля, определяемые потенциалом Бома и самодействием спинов частиц, а уравнение эволюции плотности спина модифицируется нетривиальным эффектом спинового крутящего момента. Последний возникает в результате самодействия спинов бозонов в системе многих взаимодействующих атомов наряду

со спин-спиновыми взаимодействиями. В общем случае в уравнениях движения также есть тепловые поправки, характеризующиеся термоспиновыми взаимодействиями. В качестве приложения формализма были исследованы дисперсионные свойства замагниченного нейтрального бозе-эйнштейновского 3D конденсата спина-1, получен вклад равновесной намагниченности в уравнение дисперсии мод Боголюбова.

- Проблема нарушения четности в калибровочной теории гравитации Пуанкаре была исследована для двух классов моделей: расширенной теории Эйнштейна — Картана с так называемым членом Холста и квадратичной модели Пуанкаре с наиболее общим лагранжианом, включая полный четно-нечетный сектор. В обеих моделях было выведено эффективное уравнение Эйнштейна и изучена структура и свойства эффективного тока энергии-импульса для произвольных источников вещества. С целью определить спектр спиновых мод в более общих калибровочных теоретико-полевых моделях с динамической связностью были найдены гравитационно-волновые решения в рамках аффинно-метрической теории для класса лагранжианов, построенных из всевозможных четных квадратичных инвариантов напряженностей гравитационного поля. Показано, что общее решение описывается семью скалярными потенциалами, удовлетворяющими системе из семи уравнений Гельмгольца или экранированных уравнений Лапласа. Следует подчеркнуть, что большинство результатов было получено без или с очень мягкими ограничениями на константы связи, так что полученные волновые геометрии являются точными решениями для больших семейств гравитационных моделей. Важность результатов состоит в том, что структура волновых решений определяет спиновый спектр моделей.
- Поскольку при анализе спиновой динамики частиц в прецизионных экспериментах в накопительных кольцах требуется адекватное понимание электродинамики в неинерциальных системах отсчета, была построена общеквариантная формулировка теории Максвелла, которая справедлива в любых гравитационных полях и в произвольных неинерциальных системах отсчета. Для случая вращения в отсутствие электрического тока найдено общее стационарное решение уравнений Максвелла в терминах двух скалярных функций — электрического и магнитного потенциалов, которые удовлетворяют соответ-

ственно уравнению Пуассона и бигармоническому уравнению для произвольной плотности заряда. Рассмотрение классической проблемы Шиффа (для пары вращающихся концентрических заряженных сфер, образующих сферический конденсатор) показало, что двумя индуцированными вращением магнитными моментами создается всюду нетривиальное магнитное поле с дипольной структурой. Полученные результаты создают основу для исследования более общего случая, когда гравитационные эффекты учитываются наряду с инерциальными.

6. Новый подход к теории элементарных частиц. Черная дыра Керра объединяет гравитацию с квантовой теорией

Объединение гравитации с физикой элементарных частиц является одной из фундаментальных проблем современной теоретической физики. Главным кандидатом на теорию объединения предполагалась теория суперструн, базирующаяся на супергравитации и предполагаемом планковском масштабе гравитационного взаимодействия $\approx 10^{-33}$ см, основанном на сферически-симметричном решении Шварцшильда. Открытое в 1963 г. решение Керра для вращающейся черной дыры показало, что учет спина элементарной частицы приводит к изменению шкалы гравитационного взаимодействия, сдвигу к масштабу, соответствующему комптоновской длине волны частицы. Элементарная частица принимает форму **сингулярного кольца Керра** радиуса $a = J/mc$, который зависит не только от массы частицы m , но также и её спина, в частности, для электрона $J = \hbar/2$. В 1969 г. Картер обнаружил, что решение Керра — Ньюмена (КН) (метрики Керра с зарядом e) имеет двойное гиромангнитное отношение ($g=2$), такое же как у электрона Дирака, что послужило началом рассмотрения модели электрона Керра — Ньюмена (КН), совместимой с гравитацией.

Образование черных дыр связано с гравитационным эффектом затягивания пространства, который никогда ранее не рассматривался в физике частиц (рис. 2.4.19, 2.4.20).

При слабом вращении, $a^2 < m^2 + e^2$, решение КН образует **вращающуюся черную дыру**, в которой сингулярное кольцо Керра закрыто от внешнего наблюдателя горизонтом. Условие $a^2 > m^2 + e^2$ соответствует **сверхвращающейся черной дыре**, при котором горизонт исчезает, и сингулярное кольцо оказывается голым (рис. 2.4.20).

В этом случае термин «черная дыра» является условным, и решение Керра — Ньюмена об-

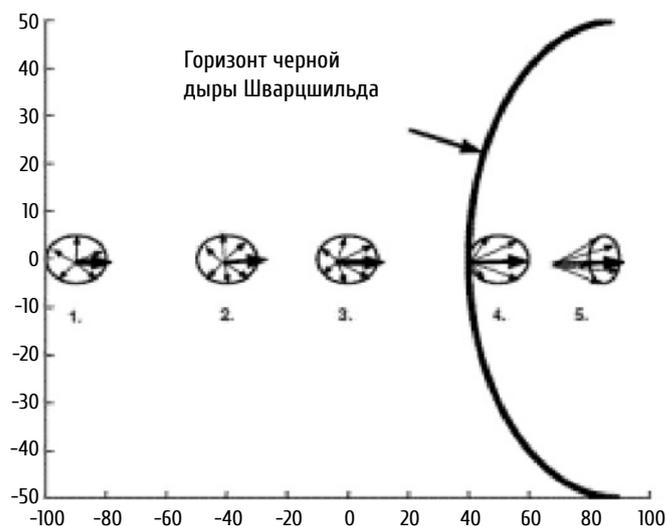


Рис. 2.4.19 — Черная дыра Шварцшильда. Затягивание световых конусов 1, 2, 3 по мере приближения точек наблюдения к горизонту. Жирные стрелки указывают направление наклона конусов. Конус 4 расположен на горизонте, конус 5 под горизонтом

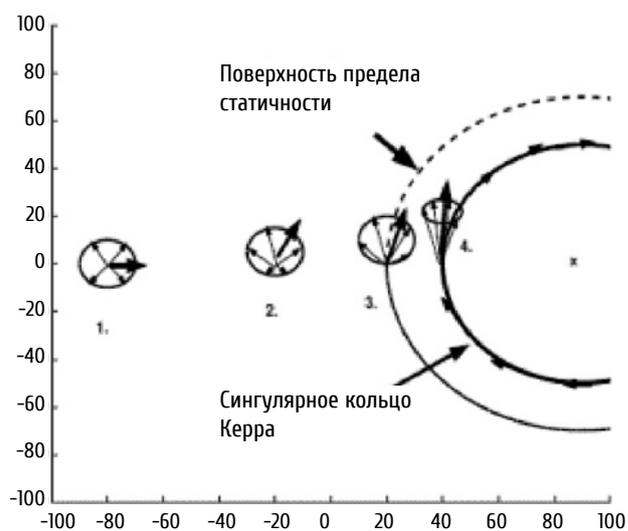


Рис. 2.4.20 — Сверхвращающаяся черная дыра. Решение Керра — Ньюмана в экваториальной плоскости. Жирные стрелки указывают направление наклона конусов 1, 2, 3, когда они приближаются к сингулярному кольцу Керра. Конус 3 расположен на поверхности статического предела, а конус 4 является касательным к сингулярному кольцу Керра

разует кольцевую струну, которая аналогична 11-мерной релятивистской струне теории суперструн, но базируется на классических уравнениях Эйнштейна — Максвелла в 4-мерном пространстве. Голое сингулярное кольцо Керра генерирует сингулярное (расходящееся) выражение для тензора энергии-импульса полной системы гравитационного и электромагнитного поля, и требуется некоторая регуляризация, чтобы нормализовать полную энергию. Регуляризация производится обрезанием поля при $r < \delta$,

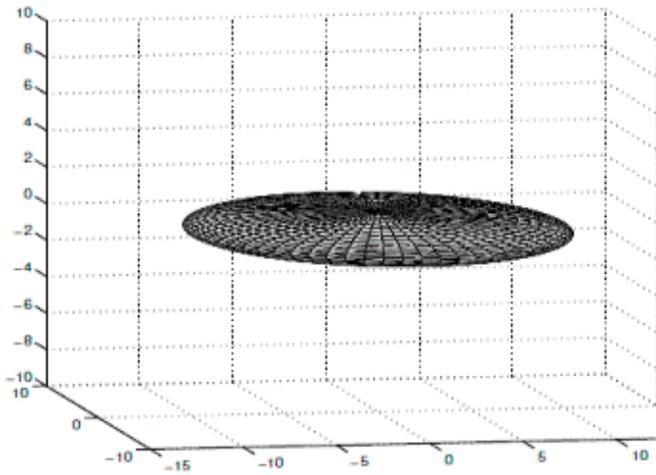


Рис. 2.4.21 — Диск Керра, образующий вакуумную зону решения КН. Кольцевая струна Керра расположена на границе диска

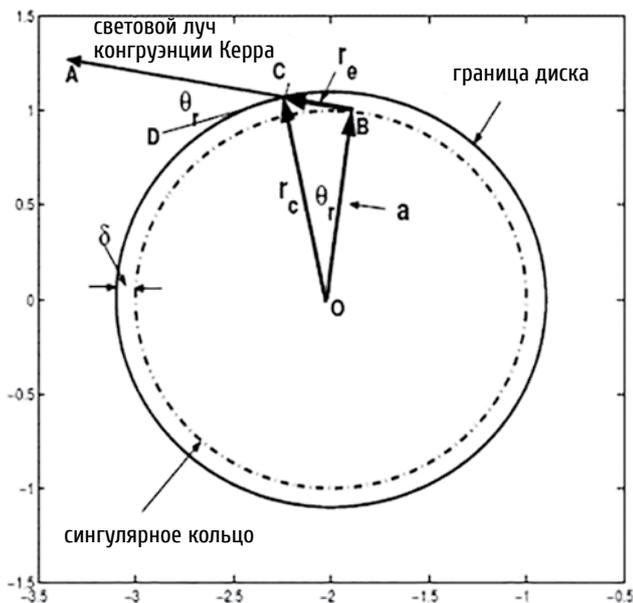


Рис. 2.4.22 — Кинематические соотношения. Световой луч выходящей конгруэнции Керра касателен к сингулярному кольцу Керра в экваториальной плоскости и пересекает направление тока (край диска) под углом $\theta \approx r_c/a \approx 37^\circ$. Сингулярное кольцо Керра показано пунктиром

где r — расстояние до сингулярного кольца. Как следствие регуляризации вокруг сингулярного кольца Керра образуется вакуумная зона в виде тонкого эллипсоидального диска (рис. 2.4.21).

Сечение диска в экваториальной плоскости показано на рис. 2.4.22.

Важно подчеркнуть, что кольцевая струна Керра (решение КН) является **точным решением** уравнений Эйнштейна — Максвелла, и расходящийся интеграл энергии кольцевой струны

дает после регуляризации явное конечное выражение для тензора энергии-импульса системы, соответствующее массе рассматриваемой элементарной частицы.

Рассматривая решение Керра — Ньюмана как точное решение классической гравитации Эйнштейна в 4-мерном пространстве-времени, мы отказываемся от многих особенностей известной квантовой теории суперструн. В частности, от всех особенностей 11-мерной теории супергравитации, теории D-бран и вейлевской инвариантности теории, связанной с введением поля дилатона.

Однако некоторые специфические объекты теории суперструн выживают, и одним из таких важных объектов является **петля Вильсона**, которая в случае сверхвращающейся черной дыры связана с гравитационным затягиванием пространства сингулярным кольцом Керра.

Затягивание пространства КН производится в направлении главной нулевой конгруэнции Керра $k_\mu(x)$, которая определяет наклон световых конусов, метрическую форму Керра — Шильда, и значение вектор-потенциала на границе регуляризованного решения КН.

Конгруэнция Керра определяется теоремой Керра, которая устанавливает соответствие между спинорными угловыми координатами точечной частицы и спинорной параметризацией кольцевой струны, возникающей на границе диска Керра (см. рис. 2.4.22). Это позволяет сформировать уравнение Дирака в виде двух спинорных полу-струн, расположенных по периметру диска Керра. Квантовое возбуждение струны формируется как сумма «левой» и «правой» световых волн, и мы принимаем «левую» полу-струну как основной вектор состояния элементарной частицы $|ket\rangle$ в представлении Гейзенберга, что соответствует расположению левой полу-струны на спинорной границе диска Керра при фиксированном моменте времени $t=t_0$. Релятивистская струна является объектом с нулевой массой покоя, и связанная с ней масса-энергия формируется как результат взаимодействия светоподобных мод и граничных условий. В частности, решения классической струны Намбу — Гото формируются как сумма левых и правых светоподобных волновых возбуждений. Метрика Керра двулистка, и структура координат Керра — Шильда показывает, что даже после регуляризации решения КН (с отсечением отрицательного листа геометрии Керра), на диске Керра формируются две кольцевые границы: одна связана с входящей, а вторая с уходящей конгруэнцией Керра. Две

границы порождают две полу-струны, и соответствующие две петли Вильсона имеют взаимно-противоположные ориентации. Приписывая «левому» струнному возбуждению квантовый вектор состояния $|ket\rangle$, мы принимаем, что «правое» струнное возбуждение соответствует ко-вектору $\langle bra|$. Мы обнаруживаем, что петли Вильсона формируют не только натяжение двух кольцевых полу-струн Керра, но также, что каждая из них порождает магнитный поток связанный с кольцевым набегом фазы вектор-потенциала. В результате вектор $|ket\rangle$ приобретает магнитный момент монополя Дирака $\hbar c/2e$, равный половине кванта магнитного поля $\hbar c/e$, но монополю не может возникнуть один, и появление анtimoнополя предсказывается в ко-векторе $\langle bra|$.

Вакуумное поле теории Дирака формируется в дискообразном ядре струнной модели частицы Керра как сверхпроводящее состояние в форме куперовской пары $\langle bra|ket\rangle$ с магнитной связью между левой и правой полу-струнами.

7. Исследования на стыке низкоэнергетической ядерной физики, физики высокотемпературной плотной лазерной плазмы, квантовой оптики и метрологии для разработки нового стандарта времени и частоты на базе низкоэнергетического перехода в ядре тория-229

В рамках второго порядка теории возмущений для квантовой электродинамики рассчитано сечение неупругого рассеяния мюонов с энергиями 9—100 эВ на ядрах ^{229}Th . Показано, что преобладающий вклад в возбуждение низкоэнергетического изомера $^{229\text{m}}\text{Th}$ (8.19 эВ) вносит E2 мультиполь, а сечение возбуждения достигает значения 10^{-21} см² в диапазоне 10 эВ. Полученное сечение на четыре-пять порядков больше сечения электронного возбуждения, в которое основной вклад дает M1 мультиполь, и достаточно для эффективной наработки изомера $^{229\text{m}}\text{Th}$ на мюонных пучках следующего поколения мюонных коллайдеров.

Исследована нейтральная и положительно заряженная примесь тория Th^{n+} с $n = 0—4$ в твердом аргоне. Установлена природа химической связи в двухатомной молекуле ThAr и в кластерах ThAr_4 , ThAr_{12} , $\text{Th}^n+\text{Ar}_{18}$ в рамках метода Хартри — Фока с поправкой на возмущение второго порядка (MP2), учитывающей силы Ван-дер-Ваальса. Химическая связь формируется из валентных состояний тория и поляризованных состояний аргона в кластерах с Th^{n+} для $n = 0—3$ и исключительно из поляризованных состояний в кластерах с Th^{4+} . Показано, что в случаях с дву-

мя или более валентными электронами Th основным состоянием Th является высокоспиновое состояние. Установлено, что средняя длина связи Th-Ar уменьшается, а энергия связи увеличивается с увеличением степени ионизации n . Это объясняется ослаблением отталкивания в системе Th-Ar и усилением поляризации. Для $\text{Th}^{4+}\text{Ar}_{18}$ обнаружены две конформации (кубическая и ромбическая). Оказалось, что длины связей Th-Ar очень близки к длинам связей Ar-Ar в ГЦК решетке и как следствие твердый аргон является подходящим материалом для размещения примесных атомов и ионов тория.

Исследован ансамбль ионов ^{229}Th , внедренных методом импульсной лазерной имплантации в матрицу широкополосного диэлектрика — оксида кремния. Выполнены эксперименты по исследованию времени жизни ионов тория как заряженных компонентов системы $\text{Th}^+:\text{SiO}_2/\text{Si}$, образующихся сразу после лазерной имплантации. Показано, что практически мгновенная зарядка поверхности посредством быстрой лазерной имплантации постепенно уменьшается из-за эффекта автоэлектронной эмиссии. Последняя приводит к зависящей от времени частичной нейтрализации поверхностного заряда в результате туннелирования электронов. Оказалось, что время жизни ионов Th^+ на поверхности SiO_2 превышает 10 с, что позволяет изучать низкоэнергетический ядерный изомерный переход в изотопе ^{229}Th .

Экспериментально и теоретически изучены конденсированные пленки твердого аргона на поверхности золота. Измерения спектров потерь энергии отраженных электронов (REELS) и рентгеновских фотоэлектронных спектров (XPS) проводились при температурах 5°K и 20°K. Теоретические расчеты методом теории функционала плотности (DFT) и с помощью решения уравнения Бете — Солпитера при учете обоих возможных типов решетки твердого аргона (гранецентрированной кубической и гексагональной плотноупакованной) хорошо воспроизвели REELS. В расчетах учитывались диэлектрическая экранировка локального поля, квазичастицы и экситонные эффекты. Оказалось, что экситонные пики в REELS появляются примерно при 12 эВ, тогда как рассчитанная электронная запрещенная зона составляет 14.3—14.4 эВ для обоих типов решеток. Таким образом, сплошная пленка аргона действительно является широкозонным диэлектриком, практически идеальным для имплантации Th и изучения изомерного ядерного перехода VUV диапазона в ^{229}Th .

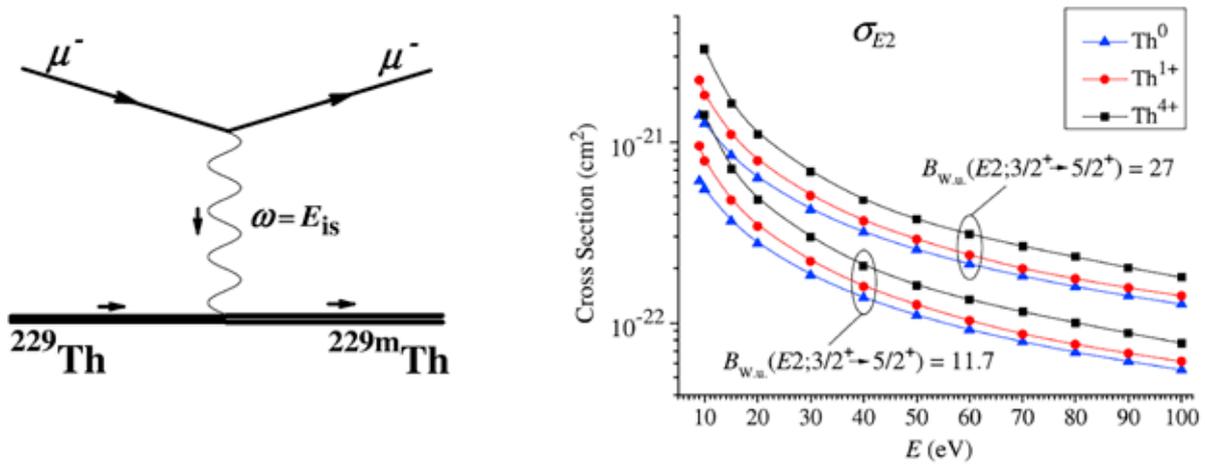


Рис. 2.4.23 – Диаграмма Фейнмана неупругого рассеяния мюонов ядром ^{229}Th и сечения возбуждения низколежащего изомера $^{229\text{m}}\text{Th}$

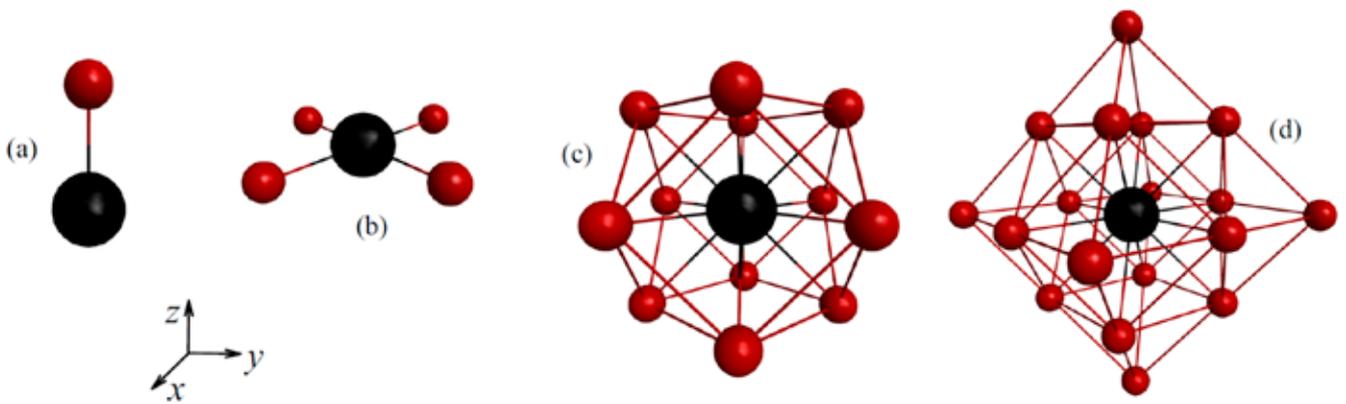


Рис. 2.4.24 – Молекула ThAr и возможные кластеры тория (черный) с аргонем (красный)

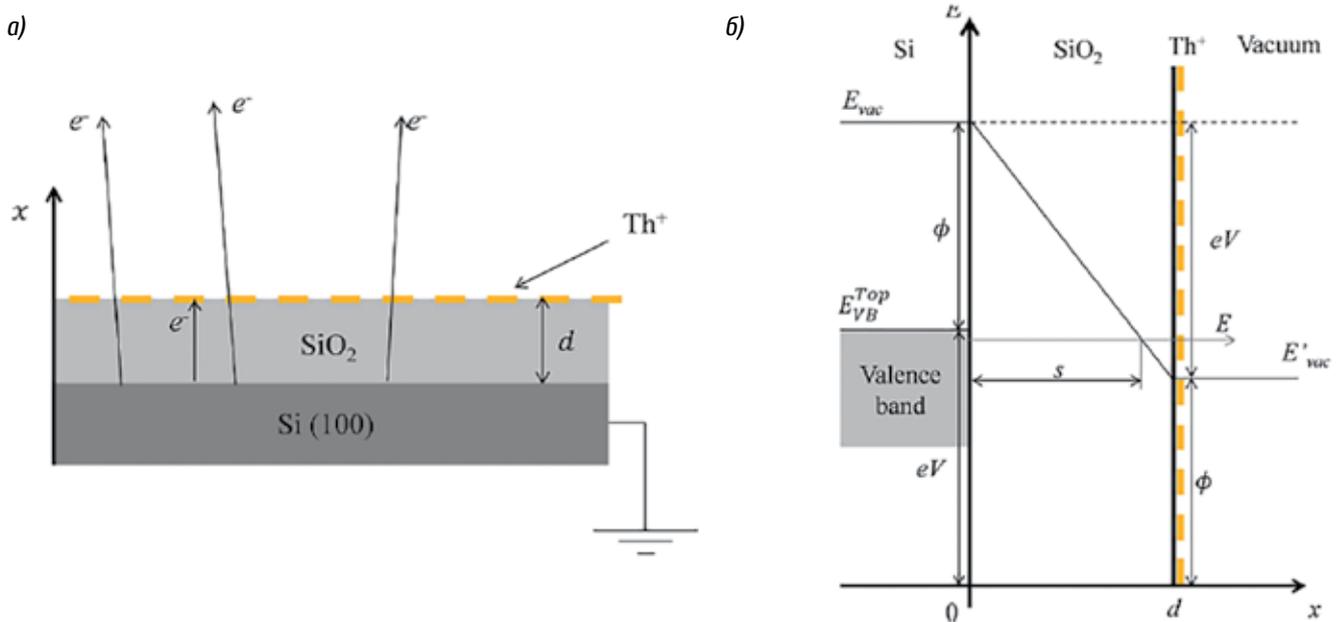


Рис. 2.4.25 – (а) Схема образца SiO_2/Si с тонкой пленкой Th; (б) Потенциальный барьер в образце

КЛЮЧЕВЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАБОТ

1. Кондратенко П.С., Матвеев А.Л., Обухов Ю.Н. Асимптотическая теория анизотропной классической диффузии в неоднородных средах // ЖЭТФ. — 2021. — Т. 159. — № 4. — С. 719–723.
2. Кондратенко П.С., Матвеев А.Л. Неклассический перенос примеси в модели Дыхне с параметрами, зависящими от координат. Принцип Ферма // ЖЭТФ. — 2021. — Т. 159. — № 4. — С. 724–729.
3. Kondratenko, P.S., Matveev, A.L. and Vasiliev, A.D. Numerical implementation of the asymptotic theory for classical diffusion in heterogeneous media. / February 2021, The European Physical Journal B 94(2), 50, DOI: 10.1140/epjb/s10051-020-00021-7.
4. Кондратенко П.С., Леонов К.В. Неклассические процессы переноса примеси в резко контрастной среде в присутствии одиночной крупномасштабной неоднородности // ЖЭТФ. — 2021. — Т. 160. — № 6 (12). — С. 898–902.
5. Аветисян А.Р., Корчагина О.О., Матвеев Л.В. Кинетическая модель эволюции жидких включений в соляных породах при высоких градиентах температуры // Радиоактивные отходы, 2022 (в печати).
6. Аветисян А.Р., Корчагина О.О., Матвеев Л.В. Модель термомиграции жидкого включения в монокристалле галитов в поле градиента температуры // Радиоактивные отходы, 2022 (в печати).
7. Vasiliev A., Matveev L., Mikhaylov A., Mitrofanov A., Obukhov Yu., Orekhov N., Osadchy A., Stegailov V. Theoretical Study of Electronic Structure of Charged Fullerenes // Journal of Nanomaterials, 2021 — Article ID 6656716, 10 p.
8. Vasiliev A.D. Analytical Modelling of ATF Chromium-Coated Zr-Based Cladding High Temperature Oxidation in Steam and Steam-Air Atmosphere // Proc. International Conference "Nuclear Energy for New Europe 2021" (NENE-2021), Bled, Slovenia, September 6–9, 2021. NENE-2021-416.
9. Дворниченко М.Е., Васильев А.Д., Михайлов А.Д. Теоретическое сравнение структуры электронных уровней нейтрального и заряженного фуллерена // Материалы 13-й Международной конференции CF-PMST2021 «Углерод: фундаментальные проблемы науки, материаловедение, технология». г. Москва, г. Троицк, РФ, 25–27 октября 2021 г.
10. Vasiliev A.D. Development of New Model to Calculate High-Temperature Oxidation of ATF Chromium-Coated Zr-Based Cladding // Proc. 26th International QUENCH Workshop (QUENCH-26), Karlsruhe, Germany, December 6–10, 2021.
11. Trukhanova M.I., Obukhov Yu.N. Quantum hydrodynamics description of spin-1 Bose-Einstein condensates // Physica Scripta, 2021, — vol. 96, p. 025401.
12. Jimenez-Cano A., Obukhov Yu.N. Gravitational waves in metric-affine gravity theory // Phys. Rev. D., 2021, — vol. 103, p. 024018.
13. Obukhov Yu.N. Parity violation in Poincare gauge gravity // Int. J. Geom. Meth. Mod. Phys., 2021. — vol. 18, p. 2150022.
14. Obukhov Yu.N., Puetzfeld D. Demystifying auto-parallelism in alternative gravity // Phys. Rev. D., 2021, — vol. 104, p. 044031.
15. Obukhov Yu.N. Electrodynamics in noninertial frames // Eur. Phys. J. C., 2021, — vol. 81, p. 919.
16. Trukhanova M.I., Obukhov Yu.N. Quantum hydrodynamics of spinning particles in electromagnetic and torsion fields // Universe, 2021, — vol. 7(12), p. 498.
17. Burinskii A. The Dirac electron consistent with proper gravitational and electromagnetic field of the Kerr-Newman solution // Galaxies, 2021, — vol. 9(1), p. 18.
18. Tkalya V. Cross section of the Coulomb excitation of ^{229}mTh by low energy muons // Chinese Phys. C. 2021, 45, 094102.
19. Nikolaev V., Tkalya E. V. Neutral and charged thorium impurity in solid argon // Phys. Rev. A, 2021, 104, 032819.
20. V. Borisyuk, E. V. Chubunova, N. N. Kolachevsky, Yu. Yu. Lebedinskii, E. V. Tkalya, O. S. Vasilyev, V. P. Yakovlev. Autoelectronic emission and charge relaxation of thorium ions implanted into a thin-film silicon oxide matrix // Laser Phys. Lett., 2021, 18, 025301.
21. P. Derevyashkin, P. V. Borisyuk, K. Yu. Khabarova, N. N. Kolachevsky, S. A. Strelkin, E. V. Tkalya, D. O. Tregubov, I. V. Tronin, V. P. Yakovlev. Cumulative loading of the ion trap by laser ablation of thorium target in buffer gas // Laser Phys. Lett., 2021, 18, 015501.

3 Развитие инфраструктуры



Заместитель директора

В. Н. Лазарев

(laz@ibrae.ac.ru)

В 2021 году ИБРАЭ РАН реализованы мероприятия по развитию инфраструктуры и созданию оптимальных условий для эффективной деятельности научного коллектива Института в условиях пандемии COVID-19 и связанного с ней перевода большого количества сотрудников на дистанционный режим работы. Эти мероприятия были направлены на:

- реконструкцию и повышение производительности систем жизнеобеспечения Института;
- развитие вычислительных и коммуникационных сетей Института, систем видеоконференцсвязи и удаленного доступа;
- поддержание в работоспособном состоянии и развитие применяемых измерительных систем.

Развитие вычислительных и коммуникационных сетей Института

В 2021 году осуществлялись следующие работы по развитию аппаратно-программного комплекса ИБРАЭ РАН, включающего в себя парк вычислительной техники (персональные компьютеры, рабочие станции, специализированные серверы и системы хранения данных), вычислительный кластер, информационные системы и системы видеоконференцсвязи, комплекс виртуализации:

- общая производительность вычислительных ресурсов Института увеличена на 230 TFlops и достигла 282 TFlops;
- ядро локальной вычислительной сети ИБРАЭ имеет производительность 10 гбит/с;
- увеличен доступный объем распределенной системы хранения данных (СХД);

- создана система онлайн-голосования;
- создан сервер централизованной работы сотрудников Института (terminal сервер), предоставляющий сотрудникам вычислительные ресурсы (процессорное время, память, дисковое пространство) для решения расчетных задач;
- создан сервер Git (распределенная система управления версиями);
- расширены функциональные возможности и ресурсы централизованной системы доступа VPN для предоставления сотрудникам доступа к ресурсам и сервисам ИБРАЭ РАН;
- расширен объем облачного хранилища данных, предназначенного для использования сотрудниками ИБРАЭ РАН;
- осуществлялась поддержка кластеров виртуализации VMware, KVM;
- увеличена мощность централизованного кластера виртуальных рабочих мест, обеспечивающего для сотрудников ИБРАЭ РАН возможность работы в дистанционном режиме;
- расширены функциональные возможности централизованной системы видеоконференцсвязи ИБРАЭ РАН (polysom), реализована поддержка полностью удаленных решений;
- обновлена служба каталогов корпорации Microsoft;
- приобретено и введено в эксплуатацию более 60 единиц высокопроизводительных ПК, рабочих станций и серверов; с целью обеспечения их эффективного функционирования в 2021 году закуплены или продлены ранее приобретенные лицензии (суммарно более 550 единиц), охватывающие 10 наименований ПО.

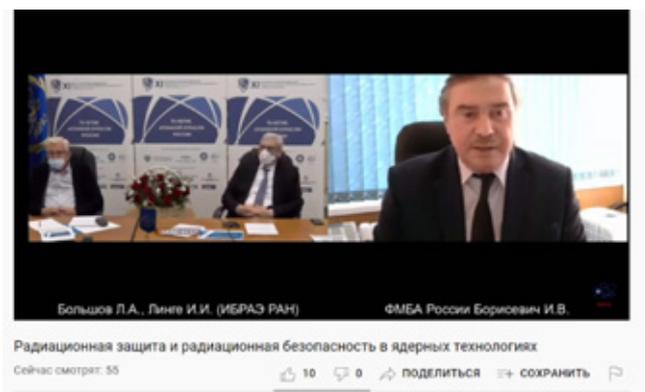


Рис. 3.1 – Система видеоконференцсвязи обеспечила возможность проведения XI Российской научной конференции «Радиационная защита и радиационная безопасность в ядерных технологиях» в дистанционном формате

Характеристики кластера ИБРАЭ РАН:

- пиковая производительность: 239.8 TFlop/s;
- использует межзвонное взаимодействие на скорости 200G HDR по топологии FatTree;
- в вычислительном поле установлены процессоры Intel® Xeon® 3-го поколения (Ice Lake);
- построен на инфраструктуре Lenovo Neptune с жидкостным охлаждением;
- в узле машинного обучения установлен NVidia A100 40GB PCI-E, ускоритель вычислений содержит CUDA-ядер: 16128;
- отказоустойчивая СХД объемом 160 ТБ;
- узел визуализации на базе двух графических ускорителей NVIDIA RTX 6000 содержит 9216 микроядер;
- находится на 25 месте в ТОП 50 суперкомпьютеров <http://top50.supercomputers.ru/list>.

Своевременное обслуживание системы коммуникаций Института обеспечило в 2021 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.

Система видеоконференцсвязи обеспечила возможность проведения в дистанционном формате заседаний Ученого и Диссертационного советов ИБРАЭ РАН, Научно-технического совета № 10 «Экология и радиационная безопасность» Госкорпорации «Росатом», секционных заседаний XI Российской научной конференции «Радиационная защита и радиационная безопасность в ядерных технологиях», международных онлайн-семинаров, лекций и семинаров по специальности для студентов, обучающихся на кафедре проблем безопасного

развития современных энергетических технологий, других научных и организационных мероприятий Института.

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 ЦНТП ИБРАЭ РАН поддерживается постоянная готовность мобильной группы радиационной разведки. В состав оборудования, в том числе, входят:

- спектрометр МКС-АТ6101С в комплектации «Васкраск», 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-PM1610 «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.

При проведении работ на объектах ядерного наследия и на площадках предприятий атомной отрасли в 2021 году активно использовался высокопроизводительный лазерный сканер, предназначенный для оперативного создания трехмерных моделей местности.

4 Международное сотрудничество



Начальник отдела

Л. Г. Шпинькова

к.ф.-м.н.

(lgs@ibrae.ac.ru)

2021 год стал еще одним годом напряженной международной работы сотрудников ИБРАЭ РАН, несмотря на продолжающуюся пандемию COVID-19. Институт полностью адаптировался к новым методам работы в удаленном формате и активно продолжал сотрудничество с Агентством по ядерной энергии (АЯЭ) ОЭСР, МАГАТЭ, национальными институтами и организациями зарубежных стран в области обеспечения безопасности ядерной энергетики, безопасного обращения с радиоактивными отходами и их изоляции, радиационного мониторинга и аварийного реагирования.

Сотрудничество с Агентством по ядерной энергии (АЯЭ) Организации экономического сотрудничества и развития (ОЭСР)

В последние годы сотрудничество ИБРАЭ РАН с Агентством по ядерной энергии (АЯЭ) идет нарастающими темпами. Об этом свидетельствует и рост числа экспертов ИБРАЭ РАН, номинированных в органы и рабочие группы АЯЭ, и международных проектов, в которых участвует ИБРАЭ РАН, и количества совещаний, семинаров и конференций, проводимых АЯЭ, в которых наши сотрудники принимают участие и выступают с докладами и сообщениями.

Специалисты ИБРАЭ РАН продолжили работу в комитетах, экспертных и рабочих группах Агентства по обеспечению научной и технологической базы для безопасного, экологически чистого и экономичного развития ядерной

энергии. **Совещания всех комитетов и рабочих групп АЯЭ, семинары и конференции в 2021 г. проводились в виртуальном формате.** Специалисты ИБРАЭ РАН приняли участие в **37 мероприятиях АЯЭ.**

В 2021 г. ИБРАЭ РАН был представлен в **3 комитетах** и в **18 рабочих и экспертных группах АЯЭ.** Научный руководитель ИБРАЭ РАН академик **Л. А. Большов** является членом **Бюро Комитета по безопасности ядерных установок АЯЭ (CSNI)**, и на 70-м заседании Комитета в декабре 2021 г. члены Комитета единогласно проголосовали за продление полномочий действующего состава Бюро. В 2021 г. заведующий отделением анализа долгосрочных рисков в сфере обеспечения ядерной и радиационной безопасности, д.т.н. **С. С. Уткин** был избран в бюро Комитета по обращению с радиоактивными отходами. Научный сотрудник **Д. В. Бирюков** — член Комитета по выводу из эксплуатации ядерных установок и обращению с объектами ядерного наследия.

Число экспертов ИБРАЭ РАН, представленных в комитетах, экспертных и рабочих группах АЯЭ, за 2021 г. **возросло до 18 человек.** В сентябре 2021 г. специалисты ИБРАЭ РАН **А. А. Канаев** и **Е. А. Долженков** были номинированы, соответственно, в Экспертную группу по пожароопасности (**EGFR — Expert group on Fire Risk**) и в Экспертную группу по реакторам малой мощности (**EGSMR — Expert group on Small Modular Reactors**) Комитета по безопасности ядерных установок.

Специалисты ИБРАЭ РАН продолжили научную работу в рамках **четырёх крупных международных проектов под эгидой АЯЭ**:

- «Эксперименты по смягчению последствий выброса водорода для обеспечения безопасности реактора» (**HYMERES-2**) — совместно с ГК по атомной энергии «Росатом» (отв. **А. Е. Киселев** и **А. А. Канаев**) — в отчетном году проект был завершен;
- «Подготовка информационного отчета о современном состоянии проблемы поведения горючих газов при тяжелых авариях» (**HYDROGEN-SOAR**) (отв. **А. Е. Киселев**);
- Анализ информации, касающейся зданий реакторов и контейментов АЭС «Фукусима-1» (**ARC-F**) — совместно с ГК по атомной энергии «Росатом» (отв. **К. С. Долганов**);
- Составление отчета по анализу механической прочности корпуса реактора при внутрикорпусном удержании расплава» (**RPV Integrity**) — отв. **А. С. Филиппов**,

стали участниками еще одного проекта АЯЭ:

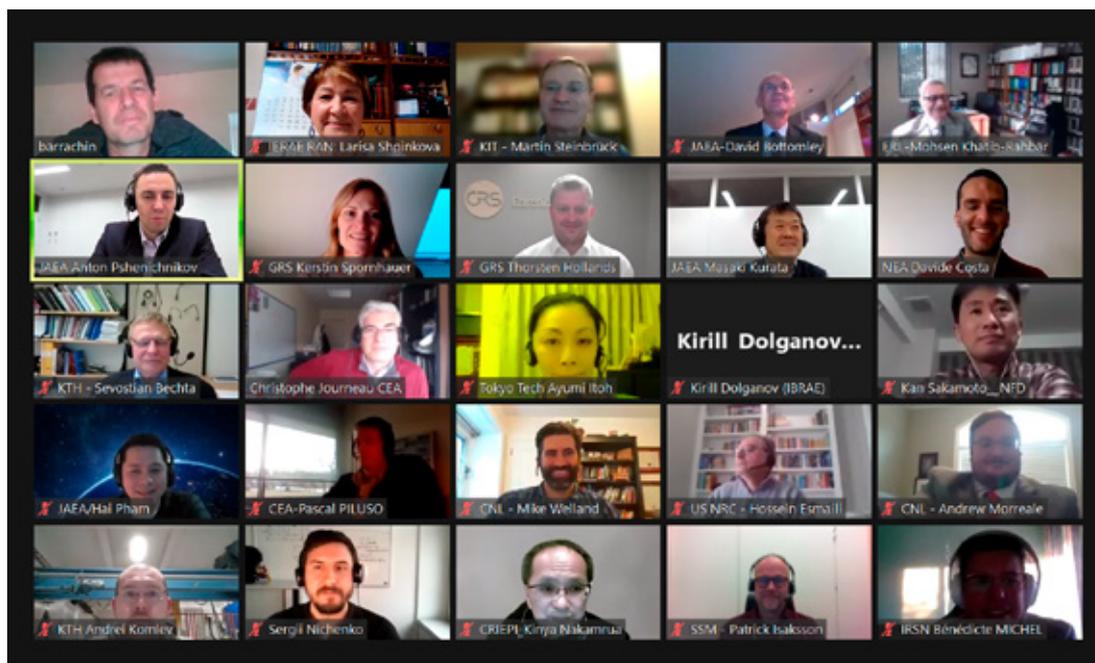
- Эксперименты THAI по мерам смягчения последствий и вопросам определения источника выброса для поддержки анализа и дальнейшего совершенствования управления тяжелыми авариями» (**Проект «THEMIS»**) — совместно с ГК по атомной энергии «Росатом» (отв. **А. Е. Киселев** и **А. А. Канаев**),

и совместно с ГК по атомной энергии «Росатом» приняли участие в подготовке двух международных проектов, которые начнутся в 2022 г.:

- Термодинамические характеристики топливного дебриса и продуктов деления, полученные на основе анализа сценария развития тяжелой аварии. Фаза 2 (**TCOFF-2**) — отв. **К. С. Долганов**;
- Эксперименты на установке **PANDA**, направленные на решение комплексных проблем безопасности современных водо-водяных реакторов и малых модульных реакторов (**PANDA**) — отв. **А. А. Канаев**.

С 2019 г. специалисты ИБРАЭ **Е. А. Савельева-Трофимова** и **В. С. Свительман** принимают участие в проекте «Развитие и практическое применение методов оценки чувствительности моделей (ориентированных на оценку безопасности пунктов глубинного захоронения РАО — ПГЗРО) к их параметрам (JOSA — JOint Sensitivity Analysis) в рамках работы международной группы при поддержке АЯЭ ОЭСР и Европейской Комиссии.

В 2021 г. вышел отчет группы JOSA (в соавторстве со специалистами ИБРАЭ РАН), посвященный применению современных подходов анализа чувствительности для задач оценки и обоснования долговременной безопасности захоронений ОЯТ и РАО.



Онлайн-совещание 16 декабря 2021 г. по подведению итогов проекта АЯЭ TCOFF и подготовке второй фазы проекта (TCOFF -2)



Обложка отчета группы JOSA, выпущенного в 2021 г. в рамках работы международной группы при поддержке АЯЭ ОЭСР и Европейской Комиссии

Отчет был выпущен под эгидой Национальной лаборатории Сандия (SNL, США), в нем также приняли участие эксперты из Общества по безопасности установок и реакторов (GRS, Германия), Клаустальского технического университета (TUC, Германия), Бельгийского ядерного исследовательского центра (SCK GEN и финского оператора по обращению с РАО (POSIVA).

Отчет обеспечивает экспертную поддержку операторов соответствующих установок в определении лучших практик и различных методов оценки чувствительности моделей в работах по проектированию ПГЗРО, проводимых в странах — участницах АЯЭ/ОЭСР.

Сотрудничество с Международным агентством по атомной энергии (МАГАТЭ)

2021 год оказался насыщенным мероприятиями в рамках сотрудничества с МАГАТЭ несмотря на то, что практически все они проходили в виртуальном формате.

ИБРАЭ РАН продолжил работу над 5 научно-техническими проектами, которые были заключены ранее в рамках международных исследовательских проектов МАГАТЭ, связанных с расчетами поведения реакторных установок и топлива и защитными мерами при аварийном реагировании с учетом метеорологических данных и др.:

- Расчет нейтронных характеристик пусковых тестов **CEFR** с использованием транспортных (CORNER) и диффузионных компьютерных кодов нового поколения (отв. **В. П. Березнев**);

- Анализ протекания аварии **ULOF** без срабатывания АЗ в реакторе FFTF с использованием расчетного кода ЕВКЛИД/V2 (отв. **Н. А. Мосунова, С. В. Цаун**);
- Определение и оценка источников неопределенностей и их влияния на расчеты ключевых параметров по тяжелоаварийному коду **СОКПАТ/ВЗ** (отв. **В. Н. Семенов, Н. И. Рыжов**);
- Применение кода **NOSTRADAMUS** для определения зон при планировании защитных мер с учетом метеорологических данных для конкретных площадок на основе четырехмерных метеорологических полей (отв. **А. А. Киселев**).
- Применение кода **HEFEST_URAN** в экспериментальных/аналитических бенчмарках и участие в разработке PIRT и валидационной матрицы (отв. **А. С. Филиппов**).

Также ИБРАЭ РАН заключил новое соглашение с МАГАТЭ об участии до 2024 г. в международном исследовательском проекте:

- «Численное исследование характеристик аварийно-устойчивого топлива в условиях запроектных аварий с помощью интегрального кода СОКПАТ» в рамках Скоординированного исследовательского проекта **МАГАТЭ 'T12032'** «Тестирование и моделирование передовых технологий и аварийно-устойчивых видов топлива (ATF-TS)» (отв. **К. С. Долганов**),

и подал заявку на участие в проекте координированных исследований **МАГАТЭ CRP I31038**:

- Бенчмарк (сравнительный анализ) процесса перехода от принудительной к естественной циркуляции в эксперименте с жидкометаллическим контуром (отв. **Н. А. Мосунова, О. Х. Ильясова**).

Специалисты ИБРАЭ РАН **А. А. Киселев** и **И. Л. Абалкина** в 2021 г. продолжили работу в качестве экспертов от Российской Федерации соответственно, в **Комитете МАГАТЭ по стандартам в области аварийной готовности и аварийного реагирования** (Emergency Preparedness and Response Standards Committee, EPRaSC) и в **Комитете МАГАТЭ по стандартам в области безопасного обращения с РАО** (Waste Safety Standards Committee, WASSC).

В 2021 г. в связи с началом работ по развитию законодательной и нормативной базы в области использования атомной энергии, включая новые типы ядерных установок, термоядерные и гибридные системы в **рамках федерального проекта «Разработка технологий управляемого термоядерного синтеза и инновационных плазменных технологий»**, ИБРАЭ РАН

был назначен контактной организацией от Российской Федерации в работах МАГАТЭ по формированию рекомендаций по безопасности термоядерных реакторов. Руководитель проектов **В.И. Шпиньков** вошел в рабочую группу по подготовке документов МАГАТЭ, посвященных регулированию и оценке безопасности и особенностям проектирования термоядерных установок. Достигнуты договоренности о регулярном предоставлении в МАГАТЭ кратких итогов реализации мероприятия федерального проекта по развитию нормативной базы для экспертной оценки и использования в будущей работе по подготовке норм безопасности МАГАТЭ для термоядерной энергетики. Специалисты ИБРАЭ РАН приняли участие в трех совещаниях МАГАТЭ по термоядерной тематике в режиме ВКС.

Сотрудники ИБРАЭ приняли участие более чем **в 40 различных мероприятиях МАГАТЭ в 2021 г.**, к которым относятся совещания по совместным исследовательским проектам, большие международные конференции (например, большая пятидневная международная конференция МАГАТЭ по совершенствованию готовности к реагированию на чрезвычайные ситуации на национальном и международном уровнях), совещания Руководящего комитета сети МАГАТЭ «ENVIRONET», учебные курсы и региональные/межрегиональные семинары в рамках проектов технического сотрудничества МАГАТЭ, вебинары по различным тематикам.

В декабре 2021 года специалист ИБРАЭ РАН **В.И. Шпиньков** принял участие в качестве эксперта МАГАТЭ (лектора) в виртуальном «Семинаре по планированию радиоэкологического и геологического мониторинга объектов изоляции РАО, взятию и анализу экологических проб и связи практической работы с проектом хранилища РАО» для пакистанских специалистов в области обращения с РАО в рамках проекта МАГАТЭ «Укрепление и расширение возможностей Пакистанских национальных институтов в поддержку безопасной, надежной и устойчивой программы развития ядерной энергетики».

Все перечисленные мероприятия в 2021 г. проходили в заочном формате, и только в одном из них — **Международной конференции «Обращение с радиоактивными отходами: решения для надежного будущего»** — заведующий отделением ИБРАЭ РАН **С.С. Уткин** принял участие в очном режиме. В качестве председателя он провел пленарную сессию № 1 «Перспективы национальных программ в области обращения с РАО», а на пленарной сессии № 4 «Значимость разработки Safety Case в поддержке вопросов обращения с РАО» представил совместный с Госкорпорацией «Росатом» доклад «Программа научных исследований по созданию пункта глубинного захоронения РАО в Российской Федерации: основные принципы создания, структура и особенности реализации».



Заведующий отделением ИБРАЭ РАН С.С. Уткин, председатель пленарной сессии № 1 «Перспективы национальных программ в области обращения с РАО» на Международной конференции «Обращение с радиоактивными отходами: решения для надёжного будущего». 1—5 ноября 2021 г., штаб-квартира МАГАТЭ (г. Вена, Австрия)

Двустороннее сотрудничество с национальными организациями зарубежных стран

Франция

Институт радиационной защиты и ядерной безопасности (IRSN) Франции был первым международным партнером ИБРАЭ РАН. Первый документ, регулирующий сотрудничество между ИБРАЭ РАН и IRSN был подписан в сентябре 1990 г. С тех пор соглашения о сотрудничестве регулярно обновляются, меняется и тематика сотрудничества. В настоящее время научные контакты между ИБРАЭ РАН и IRSN регулируются Соглашением о сотрудничестве в сфере обеспечения ядерной безопасности, которое было подписано в Париже в декабре 2019 г. на очередные 7 лет.

За прошедшие более трех десятилетий специалисты ИБРАЭ и IRSN сотрудничали в различных областях, связанных с обеспечением стабильного и безопасного развития атомной энергетики в обеих странах: аварийной готовности и реагирования, радиэкологических исследований, анализа Чернобыльской аварии, разработки кодов для оценки безопасности АЭС, моделирования выхода продуктов деления и безопасного обращения с радиоактивными отходами.

В последние годы наше сотрудничество сместилось в область обращения с РАО и геологического захоронения РАО. Эта тема является весьма актуальной, и ей уделяется пристальное внимание как в России, так и в других странах, а также на международном уровне.

В 2021 г. стороны договорились и использовали возможности развитых и хорошо освоенных во время пандемии COVID-19 электронных платформ для организации семинара, посвященного вопросам геологического захоронения РАО.

В течение двух дней, 2 и 9 марта 2021 г., специалисты двух институтов обсуждали **национальные научные программы и стратегии исследований обращения с РАО во Франции и России**, проблемы, связанные с моделированием гидрогеологического переноса, термомеханических процессов, характеристик упаковок отходов и инженерных барьеров, обеспечением надлежащего мониторинга на всем этапе эксплуатации будущих объектов финальной изоляции РАО, анализом неопределенностей и чувствительности и оптимизацией параметров разрабатываемых моделей, а также вопросы старения материалов инженерных барьеров.

В семинаре участвовали более 20 специалистов ИБРАЭ и IRSN. Делегацию ИБРАЭ РАН, состоящую из 10 человек, возглавлял д.т.н., заведующий отделением **С. С. Уткин**, вела семинар к.ф.-м.н., начальник отдела международных научно-технических проектов **Л. Г. Шпинькова**.

Программа семинара включала обмен презентациями по темам, которые были заранее определены как наиболее интересные для обсуждения и возможного сотрудничества, и обсуждение возможных совместных работ в подземных лабораториях в Турнемире (Франция) и в строящейся подземной исследовательской лаборатории на участке «Енисейский» (Красноярский край) в России.

По итогам семинара был составлен протокол, включающий в качестве приложения список вопросов и ответов по пяти темам, определенным на семинаре и представляющим взаимный интерес, а также список контактных лиц.

На протяжении ряда лет ИБРАЭ РАН участвует в ежегодных совещаниях Рабочей группы по сотрудничеству в области мирного использования атомной энергии в рамках Российско-французского совета по экономическим, финансовым, промышленным и торговым вопросам (СЕФИК), а также в совещаниях Координационного комитета в рамках сотрудничества между Государственной корпорацией «Росатом» и Комиссариатом по атомной энергии и альтернативным энергоисточникам (КАЭ) Франции в области использования атомной энергии в мирных целях.

В 2021 г. в повестку дня обоих совещаний был включен **доклад о сотрудничестве ИБРАЭ РАН и IRSN**. От ИБРАЭ РАН в совещаниях принимала участие **Л. Г. Шпинькова**, начальник отдела Международных научно-технических проектов, от IRSN — **Филипп Волан**, координатор международных отношений по вопросам ядерной безопасности, с совместным докладом. Оба мероприятия в 2021 г. проходили в виртуальном формате: совещание Росатом — КАЭ в марте, совещание РФ СЕФИК — в октябре.

Германия

Основой взаимодействия ИБРАЭ РАН с немецкими научными организациями является сотрудничество Российской Федерации и Федеративной Республики Германии в области исследований безопасности реакторов и захоронения радиоактивных отходов, координируемое совещаниями группы экспертов Государственной корпорации по атомной энергии

(«Росатом») Российской Федерации и Федерального Министерства экономики и энергетики (BMWi) Федеративной Республики Германии.

В рамках этого сотрудничества в сентябре 2019 г. было подписано **5-стороннее соглашение между ФГУП «НО РАО» и ИБРАЭ РАН**, с российской стороны и **Федеральным институтом геологических наук и природных ресурсов Германии (БГР), БГЕ Технолоджи (ООО) и Обществом по безопасности установок и реакторов Германии (ГРС)** с немецкой стороны, в области обращения с радиоактивными отходами сроком на четыре года с автоматическим продлением на следующий период при невозражении сторон.

В 2021 г. специалисты ИБРАЭ РАН и других организаций, подписавших соглашение, провели **три онлайн-совещания**, на которых обсудили актуальные вопросы сотрудничества по обоснованию долговременной безопасности пунктов геологического захоронения радиоактивных отходов, а также планирование и проведение экспериментальных исследований в российской подземной лаборатории Нижнеканского массива (ПИЛ НКМ).

27—28 сентября был проведен **2-дневный российско-немецкий семинар**, на котором все стороны представили результаты своих работ по тематике сотрудничества за прошедшие два года и подготовили рекомендации в протокол 11-го совместного координационного заседания группы экспертов Государственной корпорации по атомной энергии («Росатом») Российской Федерации и Федерального Министерства экономики и энергетики (BMWi) Федеративной Республики, которое прошло в комбинированном формате в Москве 5—6 октября 2021 г.

В совещании «Росатом-BMWi» приняли участие (в виртуальном формате) специалисты ИБРАЭ РАН: директор **Л. В. Матвеев**, зав. лабораторией **Е. А. Савельева-Трофимова** и начальник отдела **Л. Г. Шпинькова**. Представи-



Российско-немецкий семинар. 27—28 сентября 2021 г.

тельная немецкая делегация приехала в Москву и участвовала в совещании очно.

На совещании был обновлен «**Перечень проектов российско-германского научно-технического сотрудничества в области мирного использования ядерной энергии на 2021 г. и последующие годы**». ИБРАЭ РАН участвует в следующих проектах (до 2023 г.):

- продолжение работ по разработке и валидации методов анализа неопределенностей теплогидравлических и нейтронно-кинетических расчетов при помощи расчетных программ AC2 (ATHLET, ATHLET-CD, COCOSYS), KOPCAR, ТРАП-КС и СОКРАТ, а также сопряженных кодов на основе методов GRS;
- взаимная верификация сопряженных расчетно-программных комплексов AC2 (ATHLET, ATHLET-CD, COCOSYS), а также ТРАП-КС KOPCAR/ГП, СОКРАТ, АНГАР и КУПОЛ для моделирования аварий на реакторной установке и в контейнменте;
- моделирование поведения активной зоны реактора при условиях тяжелых аварий;
- валидация и сравнительный анализ сопряженных кодов AC2 (ATHLET, ATHLETCD, COCOSYS), СОКРАТ и ASTEC;
- обмен опытом по моделированию физических процессов, характерных для тяжелых аварий, с использованием немецких и российских кодов;
- исследования по внутрикорпусному удержанию расплава для ВВЭР-440 и ВВЭР-1000;
- методические и экспериментальные исследования по водородной безопасности АЭС;
- исследования водородной безопасности и работоспособности рекомбинаторов водорода в условиях тяжелых аварий с учетом новых знаний;
- основополагающие вопросы безопасного захоронения РАО (обмен информацией);
- анализ безопасности и оптимизация концепции захоронения высокоактивных и долгоживущих радиоактивных отходов в гранитоидных формациях;
- скважинные и лабораторные исследования для характеристики вмещающих пород и системы грунтовых вод.

В рамках совещания «Росатом-BMWi» в октябре 2021 г. впервые с начала пандемии COVID-19 удалось провести личную встречу сотрудников ИБРАЭ РАН с коллегами из BGR,

BGE TECHNOLOGY и GRS. Стороны подтвердили свои намерения продолжить совместные работы по следующим направлениям:

- Развитие информационного обмена по системам **VIRTUS** и **PULSE**;
- Сотрудничество в формате «обмена специалистами»;
- Геофильтрационное и геомиграционное моделирование;
- Коллоидный перенос;
- Вопросы изучения кернов;
- Совместные экспериментальные исследования в рамках проектов **MUSE** и **SUSE**;
- Публикация совместной статьи о проведении работ в рамках **сотрудничества для журнала «Радиоактивные отходы»**.

В ходе встречи стороны договорились о дальнейшем поддержании регулярных контактов, проведении онлайн-совещаний по обмену информацией о выполнении программ исследований и обсуждении хода совместных работ.

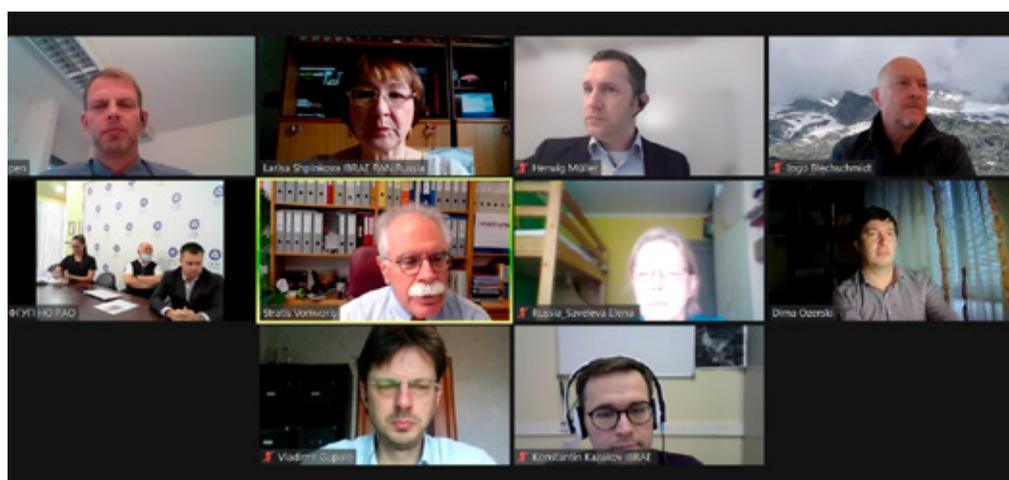
Отметим еще одно мероприятие, прошедшее в нетипичном для 2021 г. очном формате, — 18 июня 2021 г. в ИБРАЭ РАН была организована лекция проф. **Мартина Зоммерфельда** из Университета Отто фон Герике (Магдебург, ФРГ) на тему «Численное моделирование реактивных пузырьковых течений в приближении точечных масс». Лекция была посвящена обсуждению моделирования пузырьковых течений с химическими реакциями на основе метода крупных вихрей (Large Eddy Simulation) в рамках гибридного Эйлер/Лагранж подхода и вызвала значительный интерес специалистов ИБРАЭ РАН, многие из которых смогли поучаствовать в мероприятии в онлайн-режиме.

Швейцария

В конце 2020 г. было подписано трехстороннее соглашение между ИБРАЭ РАН, НО РАО и Национальным кооперативом по финальной изоляции радиоактивных отходов Швейцарии **НАГРА** по исследованиям и разработке подходов и методов обращения с радиоактивными отходами и по захоронению радиоактивных отходов.

В ноябре 2021 г. в рамках подписанного соглашения было проведено **совещание специалистов ИБРАЭ РАН, НО РАО и НАГРА в формате видеоконференции**. На совещании специалисты всех организаций представили презентации о результатах, достигнутых в 2021 г. в ходе работ по национальным проектам создания подземных лабораторий и пунктов геологического захоронения радиоактивных отходов. От ИБРАЭ РАН выступил директор Красноярского филиала ИБРАЭ РАН **Д. А. Озёрский** с докладом о достижениях в области детальной характеристики геологического массива строительства ПИЛ в 2021 г. На совещании швейцарские специалисты поделились своим опытом строительства и эксплуатации подземных исследовательских лабораторий, особенностей использования скважинного оборудования и оптимизации программы научных исследований. Было отмечено, что наработки специалистов ИБРАЭ РАН представляют интерес в части цифровых методов обработки видеокартажного материала с нанесением линеаментов для замеров трещиноватости.

По результатам совещания был сформирован пакет предложений ИБРАЭ РАН и НО РАО по развитию сотрудничества с Национальным кооперативом по финальной изоляции радиоактивных отходов Швейцарии НАГРА.



Совещание специалистов ИБРАЭ РАН, НО РАО и НАГРА в формате видеоконференции. Ноябрь 2021 г.

Турция

В 2020 г. ИБРАЭ РАН подписал договор с компанией **AKKUYU NÜKLEER ANONİM ŞİRKETİ** на выполнение работ по теме: «Расчет радиологических последствий для режима нормальной эксплуатации и аварийных режимов АЭС «Аккую» с учетом актуальных параметров площадки расположения АЭС».

В 2021 г. специалисты Отделения развития систем аварийной готовности и реагирования ИБРАЭ РАН подготовили отчеты по анализу и верификации полученных исходных данных, обоснованию размещения постов АСКРО на основании зональной схемы размещения и результатов моделирования атмосферного переноса радионуклидов и расчету радиологических последствий для режима нормальной эксплуатации и аварийных режимов АЭС «Аккую» с учетом актуальных параметров площадки расположения АЭС.

В соответствии с разработанной моделью расчета атмосферного переноса и доз облучения населения проведены варианты расчеты радиационных последствий аварийных ситуаций в 100-км области вокруг АЭС. В результате были получены дозовые характеристики в случае аварийных ситуаций, достаточные для сопоставления с аварийными критериями, сформулированными в международных нормах безопасности «Радиационная защита и безопасность источников излучения: Международные основные нормы безопасности — Основные требования. МАГАТЭ GSR Part 3».

Китай

В марте 2020 г. в дистанционном режиме было подписано 3-стороннее соглашение о сотрудничестве между ИБРАЭ РАН, ФГУП «НО РАО» и Пекинским научно-исследовательским институтом геологии урана (БРИУГ) в области долговременного хранения и захоронения радиоактивных отходов сроком на четыре года с возможностью дальнейшей пролонгации.

В рамках подписанного соглашения о сотрудничестве 31 августа 2021 г. состоялось первое онлайн-совещание с участием специалистов всех трех организаций. Совещание было посвящено знакомству с научно-исследовательскими программами в области долговременного хранения и захоронения радиоактивных отходов.

На совещании были заслушаны интересные сообщения о ходе реализации проектов создания подземных исследовательских лабораторий (ПИЛ) в Российской Федерации (Красноярский край) и Китайской Народной Республике (пустыня Гоби, Бейшан), обсуждались вопросы законодательства в области обращения с РАО.

Стороны признали важность международного и в частности двустороннего сотрудничества по развитию научных подходов, обмена опытом в области обоснования безопасности подземных хранилищ РАО и проведения совместных экспериментальных и расчетных исследований в подземных лабораториях, а также подтвердили заинтересованность в дальнейшем обмене опытом и проведении технических туров на строящиеся ПИЛ в России и Китае.



Первое онлайн-совещание с участием специалистов ИБРАЭ РАН, ФГУП «НО РАО» и Пекинского научно-исследовательского института геологии урана (БРИУГ) по вопросам долговременного хранения и захоронения радиоактивных отходов, 31 августа 2021 г.

Япония

В начале 2021 г. **Центр подземных исследований Хоронобе Японского агентства по атомной энергии (JAEA)** пригласил ИБРАЭ РАН рассмотреть предложение по участию в новом международном проекте в **Подземной исследовательской лаборатории Хоронобе в Японии**, который должен начаться в 2022 г.

Центр подземных исследований Хоронобе занимается разработками в области геологических и геофизических исследований и захоронения высокорadioактивных отходов в геологических формациях.

Подземная исследовательская лаборатория Хоронобе создана с целью изучения геологической среды в осадочных породах для подтверждения технологий геологического захоронения РАО и разработки методологий оценки безопасности.

Проект Хоронобе предусматривает проведение двух крупных экспериментов, связанных с геонаучными исследованиями и исследованиями и разработками в области геологического захоронения. Проект рассчитан на 20 лет и проводится в три этапа:

- Этап 1: наземные исследования (6 лет).
- Этап 2: исследования при строительстве подземного сооружения (6 лет).
- Этап 3: исследования с использованием ПИЛ (от 9 до 11 лет).

Еще одна важная роль ПИЛ Хоронобе заключается в повышении осведомленности общественности о геологических захоронениях высокорadioактивных РАО путем организации экскурсий для населения в лабораторию и фактического знакомства с особенностями геологического захоронения РАО.

В течение 2021 г. состоялись два совещания в режиме ВКС со специалистами Центра подземных исследований Хоронобе.

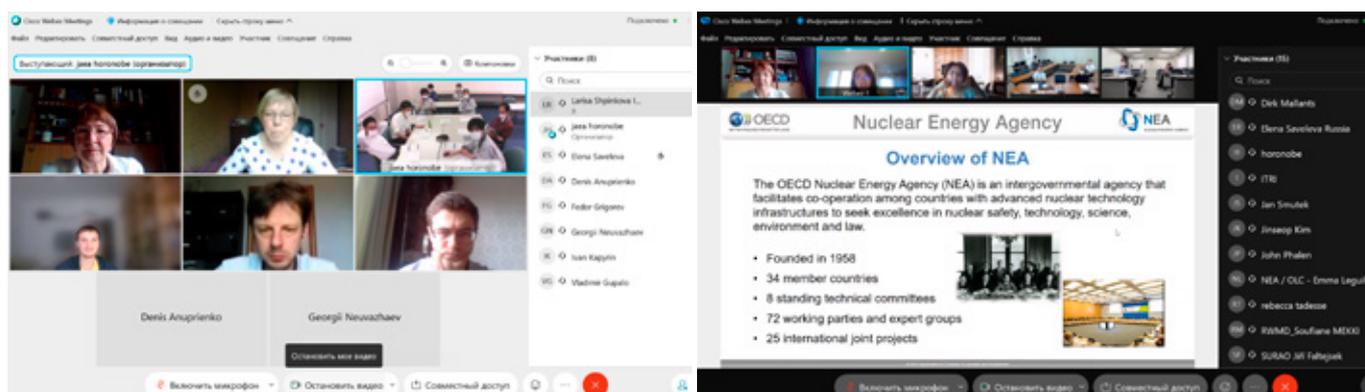
Первое ознакомительное совещание ИБРАЭ—Хоронобе было проведено в мае 2021 г. В повестке дня стоял вопрос о возможном участии ИБРАЭ в двух экспериментах в ПИЛ: эксперименте по переносу растворенных веществ (Solute Transport Experiment) и полномасштабном эксперименте по исследованию системы инженерных барьеров (Full Scale EBS Experiment at Horonobe URL).

В ходе совещания японские ученые рассказали о планах проведения экспериментов в ПИЛ, дали информацию о каждом из этих экспериментов и сроках их реализации. Специалисты ИБРАЭ РАН подтвердили, что участие в предложенных экспериментах представляет интерес для ИБРАЭ, особенно совместные работы по моделированию и верификации, а также бенчмарки по итогам экспериментов.

В заключение японская сторона дала информацию о том, что в настоящее время готовится совместный проект JAEA и АЯЭ ОЭСР, который должен быть сформирован к апрелю 2022 г.

1 сентября 2021 г. состоялось совещание АЯЭ ОЭСР, посвященное подготовке международного проекта Хоронобе. Участникам совещания рассказали об условиях участия в проекте, о типовом соглашении, которое подписывают стороны для участия в проекте и подготовительных процедурах.

Контакты с японской стороной и АЯЭ по международному проекту Хоронобе будут продолжены в 2022 г.



Совещания в режиме ВКС со специалистами Центра подземных исследований Хоронобе. Май и сентябрь 2021 г.

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 в очном и дистанционном форматах научные семинары по теоретической и математической физике, научно-популярные лекции по различным аспектам развития атомной энергетики.

В 2021 г. ИБРАЭ РАН осуществлял успешное сотрудничество с ведущими российскими и зарубежными научными издательствами (МАИК-Интерпериодика, Springer, Elsevier и международными библиометрическими базами данных (Scopus, Web of Science, ScienceDirect, RSCI) по предоставлению сотрудникам полнотекстового онлайн-доступа к профильным научным статьям и публикациям, их участию в обучающих вебинарах по наиболее актуальным проблемам работы с МББД. Эта деятельность имела особое значение в условиях, когда вследствие масштабной пандемии COVID-19 большая часть сотрудников Института была переведена на дистанционный режим работы.



ПРОФИЛЬНЫЕ КАФЕДРЫ

ИБРАЭ РАН осуществляет образовательную деятельность с целью обеспечения преемственности поколений и подготовки научных кадров в рамках сотрудничества с несколькими российскими вузами 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 Институтутом.

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 г. в ИБРАЭ РАН действует кафедра проблем безопасного развития современных энергетических технологий, в настоящее время входящая в организационную структуру Физтех-школы физики и исследований им. Ландау. 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.

Кафедра готовит специалистов по следующим научным направлениям:

- физические модели и программные средства для анализа безопасности АЭС, объектов ЯТЦ, объектов хранения и окончательной изоляции РАО;
- алгоритмы и численные методы моделирования теплогидродинамики и сопутствующих физических процессов;
- системы радиационно-экологического мониторинга и методы анализа рисков для здоровья населения и окружающей среды;
- стратегическое планирование утилизации списанных объектов атомного флота РФ и реабилитации объектов обслуживающей инфраструктуры;

- программные средства аварийной готовности и реагирования при чрезвычайных ситуациях;
- экономическая эффективность производства электроэнергии, вопросы экологии и безопасности энергетики;
- объектовые и территориальные системы радиационно-химического мониторинга;
- информационные системы.

Зачисление студентов на кафедру происходит в третьем семестре, на 2-м курсе. Занятия со студентами на кафедре начинаются на 3-м курсе.

В учебном процессе задействованы ведущие специалисты Института, в числе которых академик РАН **Л. А. Большов**, академик РАН **А. А. Саркисов**, а также **7 докторов** и **7 кандидатов наук**.

Студентам читаются более **двадцати кафедральных лекционных курсов**. С учетом растущих требований к качеству подготовки выпускников учебная программа кафедры постоянно совершенствуется, корректируются существующие и вводятся новые курсы лекций.

Занятия проводят как специалисты ИБРАЭ, так и сотрудники и преподаватели других организаций и вузов. Занятия проводятся в учебно-методическом центре, оборудованном современными компьютерами и средствами оргтехники.

В 2021 году 18 студентов проходили обучение в бакалавриате кафедры и 3 студента — в магистратуре.

Учебный процесс в весеннем и осеннем семестрах 2021 г. проводился как в очном, так и в дистанционном форматах в зависимости от эпидемиологической обстановки и возможности проведения обучения с учетом действовавшего в Москве режима самоизоляции.

Общий 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 семь лекционных дисциплин, занимаются на семинаре по специальности и выполняют дипломную работу (выпускная квалификационная работа — ВКР), которую защищают по окончании 8-го семестра, после чего получают степень бакалавра.

НА КАФЕДРЕ ПРЕПОДАЮТ:

2

АКАДЕМИКА
РАН

7

ДОКТОРОВ
НАУК

7

КАНДИДАТОВ
НАУК

Далее, при желании продолжить обучение и наличии рекомендации научного руководителя, студенты поступают в двухгодичную магистратуру и занимаются научной работой в ИБРАЭ РАН.

Пятикурсники продолжают посещать семинары по специальности, слушают 11 спецкурсов и проводят научную работу под руководством своих научных руководителей по теме своей магистерской диссертации.

6-й курс посвящен научной работе на кафедре и подготовке магистерской диссертации, учебные занятия не предусмотрены. По окончании 12-го семестра студенты защищают магистерскую диссертацию и получают степень магистра.

В 2021 году сдача зачетов и экзаменов проводилась в зависимости от режима самоизоляции студентов и преподавателей в очном или дистанционном форматах, а защиты бакалаврских работ и магистерских диссертаций осуществлялись в дистанционном формате.

Дисциплины бакалавриата

- введение в специальность;
- вычислительные системы и информационные технологии;
- кинетика физических процессов в твердых телах;
- математическое моделирование и вычислительные методы;
- математическое моделирование турбулентных течений;
- нейтронная физика в ядерных реакторах;
- программирование на «С++»;
- современные методы анализа данных — геостатистика, нейронные сети;
- теоретические основы гидродинамики и теплопереноса;
- теория ядерных реакторов.

Дисциплины магистратуры:

- аномальные режимы переноса в сильно неоднородных средах;
- гидродинамика многофазных течений;

- моделирование тяжелых аварий;
- основы радиационной биологии;
- системы поддержки и принятия решений;
- феноменология радиационных аварий;
- физика быстропотекающих 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 учебной работой в научных подразделениях ИБРАЭ РАН. Наиболее перспективные выпускники могут остаться работать в

ИБРАЭ РАН, а также поступить в аспирантуру ИБРАЭ РАН или МФТИ.

В 2021 году в ИБРАЭ РАН в рамках ежегодной 64-й научной конференции МФТИ в дистанционном режиме проводилась «Секция проблем безопасного развития атомной энергетики», в работе которой помимо студентов и аспирантов МФТИ приняли участие молодые специалисты ИБРАЭ РАН и представители других вузов и организаций.

Институт активно участвует в международном научном сотрудничестве, к этой деятельности привлекаются также 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 — в ИБРАЭ РАН, где студентам 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 ПО 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.

Примеры курсов на базе ИБРАЭ РАН:

- **Моделирование процессов, протекающих в твэлах.** Рассматриваются основные процессы в топливе и оболочке твэла, определяющие и влияющие на его работоспособность и герметичность при облучении в а.з. 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 жидкометаллическим теплоносителями.** Обсуждаются общие вопросы моделирования процессов теплообмена в контурах РУ с водяным и жидкометаллическим теплоносителями; 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 реакторах 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 быстро изменяющемся 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 отраслях проектов.



АСПИРАНТУРА

В 2020—2021 учебном году в Институте осуществлялась 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 — только очная.

Кандидаты сдавали вступительные экзамены по английскому языку и специальности.

Иногородним аспирантам предоставлялось общежитие Российской академии наук.

Аспиранты, обучающиеся на бюджетной основе, получали стипендию и также работали в лабораториях ИБРАЭ РАН.

В 2020—2021 учебном году в аспирантуре ИБРАЭ РАН обучалось **20** аспирантов, среди которых выпускники магистратуры базовой кафедры ИБРАЭ РАН в МФТИ, а также выпускники МГУ, МИФИ, МЭИ и ряда других ведущих вузов России.

В 2021 г. успешно окончили аспирантуру **5** человек, все они остались работать в Институте.



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 1995—2021 годов в Институте были успешно защищены **33** кандидатских и **12** докторских диссертаций по актуальным проблемам современной физики, теоретическим и практическим аспектам обеспечения безопасности атомной энергетики. Более 30% защитившихся представляют научные и производственные

учреждения атомной отрасли России и ряда зарубежных стран, что подчеркивает авторитетность диссертационного совета ИБРАЭ РАН в мировой научной среде.

В 2021 году в Институте сотрудниками ИБРАЭ РАН были успешно защищены **2** кандидатских и **1** докторская диссертации по теоретическим и практическим аспектам обеспечения безопасности атомной энергетики.



ИЗДАТЕЛЬСКАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ

ИБРАЭ РАН активно проводит 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 г. ИБРАЭ РАН издает научный и информационно-аналитический журнал «Арктика: экология и экономика», а с 2017 г. — научно-технический журнал «Радиоактивные отходы».

Последовательно развивается интернет-портал Института (<http://ibrae.ac.ru>). В 2021 г. особое внимание было уделено широкому освещению мероприятий, связанных с проведением Года науки и технологий в Российской Федерации и XI Российской научной конференции «Радиационная защита и радиационная безопасность в ядерных технологиях», приуроченной к 75-летию атомной отрасли России. Как следует из статистических данных, полученных с использованием сервисов Яндекс-метрика и Google Analytics, количество визитов на сайт в период с 1 января 2021 г. по 1 января 2022 г. превысило **60 000**; число новых посетителей в 2021 г. составило **38 857** человек. Общее количество просмотров активных страниц сайта в период с 1 января 2021 г. по 1 января 2022 г. составило **150 426** при средней глубине просмотра **2,51** страницы за визит.

К настоящему времени Институтом опубликовано более **70** крупных научных трудов, авторами и соавторами которых выступают сотрудники ИБРАЭ РАН, в том числе монографии и сборни-

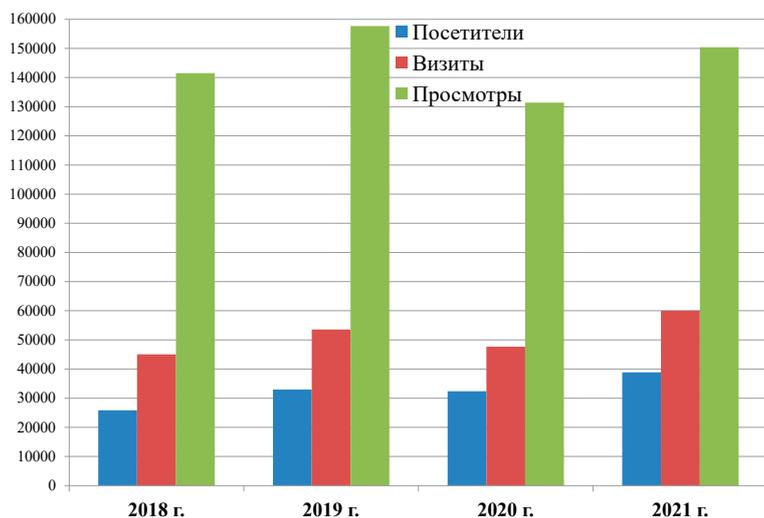
246 432 ПРОСМОТРА

**СУММАРНОЕ КОЛИЧЕСТВО
ЗА 2021 ГОД НА САЙТАХ ИБРАЭ РАН
И ВЫПУСКАЕМЫХ НАУЧНЫХ
ЖУРНАЛОВ**

ки научных трудов по основным направлениям деятельности Института, а также подготовленные при участии ИБРАЭ РАН Российские национальные доклады «Итоги и перспективы преодоления последствий чернобыльской аварии», большое количество научно-просветительской литературы по тематике безопасности атомной энергетики.

В 2021 г. Институтом подготовлены и опубликованы монография «Радиоэкологическая обстановка в регионах расположения предприятий Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом», Российский национальный доклад «35 лет чернобыльской аварии. Итоги и перспективы преодоления ее последствий в России. 1986—2021», подготовлен к печати ряд учебных пособий по компьютерным кодам нового поколения в рамках реализации проекта «Коды нового поколения», входящего в состав 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,



Посещаемость интернет-сайта ИБРАЭ РАН в 2018–2021 гг.

охватывающих все основные направления деятельности Института. В 2021 г. продолжалась подготовка к печати ряда препринтов по вопросам обращения с РАО и радиозэкологической безопасности ПЗРО.

Все подготовленные Институтом печатные издания доступны для скачивания в электронном виде в разделе «Публикации» интернет-сайта ИБРАЭ РАН.

ЖУРНАЛ «РАДИОАКТИВНЫЕ ОТХОДЫ»

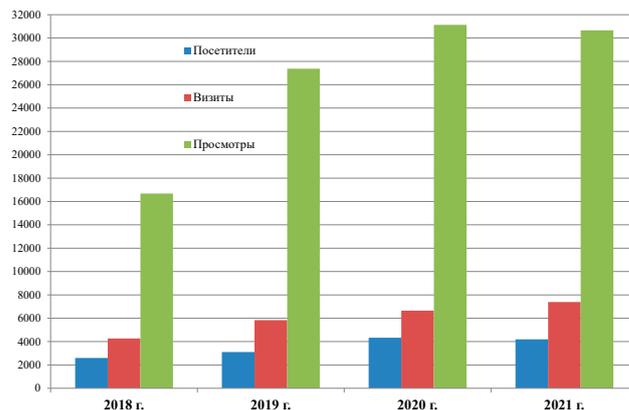
Научно-технический журнал «Радиоактивные отходы» издается с 2017 года, его учредителем является ИБРАЭ РАН. Целью создания журнала является интенсификация и углубление обмена опытом между специалистами, работающими по тематике проблем обращения с радиоактивными и вывода из эксплуатации объектов использования атомной энергии, обсуждение результатов работ в этой области, реализуемых эксплуатирующими организациями, в том числе в рамках мероприятий федеральной целевой программы «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016—2020 годы и на период до 2030 года». Основное внимание в публикуемых материалах уделяется вопросам повышения эффективности и безопасности обращения с радиоактивными отходами, формированию национального научно-информационного ресурса, обобщению и пропаганде научных знаний в этой области.

Распоряжением Минобрнауки России от 22 декабря 2020 г. № 443-р научно-технический журнал «Радиоактивные отходы» включен в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание

С ДЕКАБРЯ 2020 ГОДА ЖУРНАЛ «РАДИОАКТИВНЫЕ ОТХОДЫ» ВКЛЮЧЕН В ПЕРЕЧЕНЬ РЕЦЕНЗИРУЕМЫХ НАУЧНЫХ ИЗДАНИЙ, В КОТОРЫХ ДОЛЖНЫ БЫТЬ ОПУБЛИКОВАНЫ ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИЙ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК, НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК

ученой степени кандидата наук и ученой степени доктора наук, что существенно расширило круг авторов публикуемых статей и их тематику. Журнал «Радиоактивные отходы» индексируется в РИНЦ.

С апреля 2019 г. журнал включен в международную систему библиографических ссылок CrossRef; всем опубликованным статьям присваивается цифровой идентификатор объекта DOI.



Распределение публикаций по рубрикам журнала «РАО» в 2021 г. и посещаемость сайта журнала в 2018–2021 гг.

В 2021 году в 4 выпусках журнала было опубликовано **45** статей, что составляет около **50%** от общего количества научно-технических статей, посвященных проблеме обращения с радиоактивными отходами, опубликованных за этот год в основных российских периодических изданиях. В 2020 г. это количество составляло **42%**, а в 2019 г. — **44%**. Наибольшее количество опубликованных статей было посвящено темам захоронения радиоактивных отходов и оценке безопасности хранилищ радиоактивных отходов, вопросам их переработки и кондиционирования, а также вывода из эксплуатации объектов ядерного наследия.

Среди авторов статей **более 75% — работники научных и проектных организаций**. В подготовке материалов журнала в 2021 году приняли участие **155** ученых и специалистов, среди которых **22** доктора и **62** кандидата наук (что составляет **54%** от общего числа авторов).

Значительное улучшение библиометрических показателей журнала и устойчивая положительная динамика в части цитирования опубликованных в нем научных статей свидетельствуют о большом интересе к нему представителей научного сообщества.

По данным РИНЦ, двухлетний импакт-фактор журнала составляет **1,299**, а пятилетний — **1,333**. Быстро увеличивается количество просмотров материалов журнала, размещенных в научной электронной библиотеке. В 2018 г. оно составило **605**, в 2019 г. — **1442**, а в 2020 г. — **2929**.

В настоящее время на интернет-сайте журнала radwaste-journal.ru размещены материалы **17** номеров. В 2021 г. существенно возросла его посещаемость, что является одним из признаков востребованности журнала у целевой аудитории. Общее количество просмотров страниц сайта в период с января 2021 г. по январь 2022 г. составило **38600**, то есть возросло на **22%** по сравнению с 2020 г. Средняя глубина просмотра составила **3,69** страницы за визит, что на **5,7%** превышает показатель 2020 г. Таким образом, увеличивается интерес к материалам журнала, и он становится все более востребованным.



Журналы «Радиоактивные отходы» и «Арктика: экология и экономика» за 2021 год

ЖУРНАЛ «АРКТИКА: ЭКОЛОГИЯ И ЭКОНОМИКА»

Научный и информационно-аналитический журнал «Арктика: экология и экономика», учредителем которого является ИБРАЭ РАН, издается с 2011 г. 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 г.), индексируется в РИНЦ, входит в ядро РИНЦ, включен в базу данных Russian Science Citation Index (RSCI) на платформе Web of Science (с 2018 г.), базу данных открытого доступа DOAJ (с 2019 г.) и международную библиометрическую и реферативную базу данных EBSCO (с декабря 2019 г., база данных «Academic Search Ultimate»).

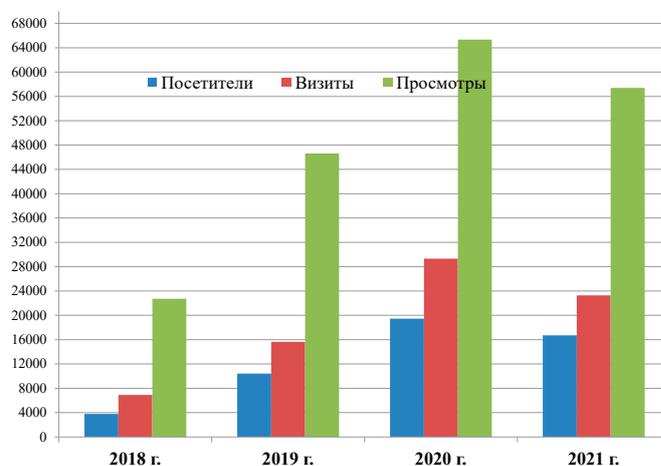
В декабре 2020 г. решением Консультативного совета по отбору контента (CSAB) журнал «Арктика: экология и экономика» включен в международную наукометрическую базу данных SCOPUS. Начиная с первого квартала 2021 г. статьи, размещенные в журнале, индексируются в базе данных SCOPUS. В связи с этим изменилась система нумерации выпусков журнала — если ранее она была сквозной, то с 2021 г. она приведена в соответствие международным требованиям (том, номер выпуска в текущем году, год издания). Таким образом, первый выпуск журнала в 2021 г. был пронумерован как Том 11, № 1, 2021.

С ДЕКАБРЯ 2020 г. РЕШЕНИЕМ КОНСУЛЬТАТИВНОГО СОВЕТА ПО ОТБОРУ КОНТЕНТА (CSAB) ЖУРНАЛ «АРКТИКА: ЭКОЛОГИЯ И ЭКОНОМИКА» ВКЛЮЧЕН В МЕЖДУНАРОДНУЮ НАУКОМЕТРИЧЕСКУЮ БАЗУ ДАННЫХ SCOPUS

Журнал с 2017 г. включен в международную систему библиографических ссылок CrossRef; всем опубликованным статьям присваивается цифровой идентификатор объекта DOI.

В конце 2021 г. подана и принята к рассмотрению заявка на включение журнала в международную наукометрическую базу данных Web of Science Core Collection.

В 2021 г. в четырех выпусках журнала опубликовано **49** статей. В их подготовке приняли участие **148** ученых и специалистов, среди которых **10** академиков и членов-корреспондентов РАН, **35** докторов наук, **56** кандидатов наук (что составляет **68,25%** от общего числа авторов); в 2019 г. в числе **119** авторов статей было **7** академиков и членов-корреспондентов РАН, **29** докторов наук, **42** кандидата наук (**65,5%** от общего числа авторов).



Распределение статей по основным рубрикам в 2021 г. и посещаемость сайта журнала «Арктика: экология и экономика» в период 2018–2021 гг.

По данным РИНЦ за 2020 г., журнал занимает **680**-е место среди всех российских научных журналов в рейтинге SCIENCE INDEX (**338**-е место по результатам общественной экспертизы) и **5**-е место по тематике «Комплексное изучение отдельных стран и регионов» (в 2019 г. журнал занимал **232**-е место в рейтинге SCIENCE INDEX, а в 2018 г. — **266**-е место); пятилетний импакт-фактор составляет **1,596**, а двухлетний импакт-фактор — **2,697**. По состоянию на январь 2022 г. общее число цитирований журнала в РИНЦ — **5772**; количество цитирований в 2020 г. составило **557** по сравнению с **517** в 2019 г. Устойчивая положительная динамика в части цитирования опубликованных в нем научных статей свидетельствуют о большом интересе к нему представителей научного сообщества.

Как следует из статистических данных, полученных с использованием сервисов Яндекс-метрика и Google Analytics, количество визитов на интернет-сайт журнала (<http://arctica-ac.ru>) в период с 1 января 2021 г. по 1 января 2022 г. составило **23276** посещений; число посетителей в 2021 г. составило **16710**, а общее количество просмотров активных страниц сайта в период с 1 января 2021 г. по 1 января 2022 г. достигло **57406** при средней глубине просмотра **2,47** страницы за визит.

Некоторое снижение посещаемости сайта журнала по сравнению с аналогичным периодом 2020 г. может быть связано с общим снижением публикационной активности вследствие масштабной пандемии COVID-19, однако основные статистические показатели продолжали оставаться достаточно высокими, что обусловлено качеством и актуальностью научного материала журнала и свидетельствует о большой востребованности предлагаемого контента у широкой целевой аудитории, в которую входят многие ученые и специалисты, область научных интересов которых тесно соотносится с тематикой журнала.

Индексирование журнала «Арктика: экология и экономика» в ведущих международных наукометрических и библиографических базах данных, участие в работе его Редакционного совета ряда авторитетных зарубежных ученых, выполненная в 2019 г. масштабная модернизация сайта журнала, значительно расширившая его функциональные и сервисные возможности, ориентированные на интеграцию в поисковых системах в русскоязычном и англоязычном сегментах Интернета, — все это позволило существенно расширить сферу охвата целевой аудитории, в том числе в ее англоязычном сегменте, и повысить уровень цитируемости статей журнала в иностранной 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».

156

КОЛИЧЕСТВО ПУБЛИКАЦИЙ об ИБРАЭ РАН В ФЕДЕРАЛЬНЫХ ПЕЧАТНЫХ И ИНТЕРНЕТ ИЗДАНИЯХ, ТЕЛЕ- И РАДИО СМИ ЗА 2021 ГОД

6 Общественные организации



СОВЕТ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ

В ИБРАЭ РАН традиционно большое внимание уделяется поддержке молодых ученых. С целью улучшения условий их работы, повышения заинтересованности и привлечения молодежи в Институт, в 2007 году был создан Совет молодых ученых и специалистов (СМУиС). Деятельность Совета осуществляется при активной поддержке администрации Института и лично академика Л. А. Большова. Совет представляет интересы студентов, аспирантов, молодых ученых, обеспечивает им информационную поддержку, а также ежегодно проводит мероприятия по повышению профессиональной квалификации молодых специалистов.

Для третьекурсников базовой кафедры МФТИ в ИБРАЭ РАН Совет организует семинары «Введение в специальность», на которых ведущие ученые и специалисты рассказывают об актуальных и перспективных направлениях работ Института. Участие в этих семинарах дает студентам возможность выбрать научного руководителя и тематику своих дальнейших исследований. В результате проведения семинаров перед студентами была широко освещена научная

деятельность ИБРАЭ РАН (выступило около 30 лекторов). К июню 2021 г. часть студентов определились с научными руководителями.

Одной из основных задач Совета является стимулирование научной деятельности молодых ученых. В связи с этим СМУиС участвует в организации и проведении комплекса ежегодных мероприятий, включающих в себя ежегодный конкурс на лучшую научную работу. В 2021 году был проведен конкурс на лучшую научную работу ИБРАЭ РАН за 2019—2021 годы. На конкурс было представлено около 20 работ, большинство которых получило высокую оценку конкурсной комиссии. В результате собрания конкурсной комиссии участникам были присуждены два первых, два вторых и четыре третьих места. Победители награждены денежными премиями.

В рамках традиционной сессии научных семинаров в ИБРАЭ РАН в 2021 году была проведена лекция к.ф.-м.н., заведующего лабораторией проблем коммуникаций при оценке рисков Е. М. Мелиховой «35 лет чернобыльской катастрофе: итоги и последствия» (17 апреля).



Заведующий лабораторией проблем коммуникаций при оценке рисков, к.ф.-м.н. Е. М. Мелихова на лекции «35 лет чернобыльской катастрофе: итоги и последствия», 17 апреля 2021 г.



Собрание СМУиС ИБРАЭ РАН, слева направо: Е. О. Кузнецова, Н. А. Галоян, А. В. Задорожный, О. О. Корчагина, А. Е. Власенко, К. С. Хачатрян, 2021 год



ПЕРВИЧНАЯ ПРОФСОЮЗНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ИБРАЭ РАН

В 2021 году численность членов профсоюза в Институте составила 322 человека, сохраняя по этому показателю стабильность в течение 5 последних лет. Оперативное руководство осуществляется Профкомом ИБРАЭ, который состоит из 9 человек, являя собой сплав молодости и опыта.

В тяжелый для всей страны год пандемии ИБРАЭ РАН, как и многие другие научные организации, перешел в основном на удаленный характер работы сотрудников. В этих непростых условиях сохранить социальную защищенность всех работников Института было особенно важно. Традиционно задачи оказания социальной помощи

сотрудникам — это адресная материальная помощь (в том числе на лечение), на детей, на путевки в лечебные учреждения (санатории).

В тесном содружестве с администрацией Института, Советом молодых ученых и специалистов и Советом ветеранов вооруженных сил Профком ИБРАЭ РАН стремится к тому, 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», «Ветераны — наша гордость».



Профком готов к проведению праздничных новогодних мероприятий в ИБРАЭ РАН, 2021 г.



Награждение сотрудников ИБРАЭ — участников ликвидации последствий аварии на ЧАЭС, 17 апреля 2021 г.

Список сокращений

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

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

PLM — управление жизненным циклом (Product Lifecycle Management)

а.з. — активная зона реактора

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

АЗ — аварийная защита

АМПРК — автономный малогабаритный пост радиационного контроля

АПЛ — атомная подводная лодка

АСКРО — автоматизированная система контроля радиационной обстановки

АСММ — атомная станция малой мощности

АТЦ ОИЯИ — Аварийно-технический центр Объединенного института ядерных исследований (г. Дубна);

АЭХК — АО «Ангарский электролизный химический комбинат» (г. Ангарск)

АЯЭ — Агентство по ядерной энергии Организации экономического сотрудничества и развития (ОЭСР)

БД — база данных

БН — реактор на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем

БР АСКРО — быстроразворачиваемая автоматизированная система контроля радиационной обстановки

БПЛА — беспилотный летательный аппарат

ВВЭР — атомный реактор водо-водяного типа

ВНИИАЭС — АО «Всероссийский научно-исследовательский институт по эксплуатации атомных электростанций» (г. Москва)

ВНИИНМ — АО «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов им. А.А. Бочвара» (г. Москва)

ВЭ — вывод из эксплуатации

ГХК — Федеральное государственное унитарное предприятие «Горно-химический комбинат» (г. Железногорск)

ГНЦ НИИАР — АО «Государственный научный центр «Научно-исследовательский институт атомных реакторов» (г. Димитровград)

ЕГС РАО — Единая государственная система обращения с РАО

ЖРО — жидкие радиоактивные отходы

ЗПА — см. «авария запроектная»

ЗН — зона наблюдения

ЗО — защитная оболочка АЭС

ЗСЖЦ — заключительная стадия жизненного цикла

ИВМ РАН — Институт вычислительной математики Российской академии наук

ИГЕМ РАН — Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук

ИГЭ РАН — Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева Российской академии наук

ИИИ — источник ионизирующего излучения

ИСУП — информационная система управления программой комплексной утилизации

ИТ СО РАН — Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения РАН

ИТЭР (ITER) — Международный экспериментальный термоядерный реактор

ИФЗ РАН — Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук

КИА — контрольно-измерительная аппаратура

КИРО — комплексное инженерное и радиационное обследование

КИХО — комплексное инженерно-химическое обследование

КФ ВАО — короткоживущая фракция высокоактивных отходов

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

МОКС-топливо — (от англ. Mixed-Oxide fuel) ядерное топливо, содержащее несколько видов оксидов делящихся материалов

МЭД — мощность эквивалентной дозы

НДС — напряженно-деформированное состояние

НИР — научно-исследовательские работы

НИОКР — научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы

НКМ — Нижнеканский массив горных пород

НК с ЯЭУ — надводный корабль с ядерной энергетической установкой

НРБ-99/2009 — нормы радиационной безопасности

НТЦ ЯРБ — Федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» (г. Москва)

НУЭ — нормальные условия эксплуатации

ОДЭК — опытно-демонстрационный энергокомплекс

ОИАЭ — объект использования атомной энергии

ОКБМ — АО «Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И. И. Африкантова»

ОПС — окружающая природная среда

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

ОЯН — объект ядерного наследия

ОЯТ — отработавшее ядерное топливо

ПА — см. «авария проектная»

ПАТЭС — плавучая атомная теплоэлектростанция

ПВХ — пункт временного хранения

ПГЗРО — пункт глубинного захоронения радиоактивных отходов

ПДХ — пункт длительного хранения

ПЗРО — пункт захоронения радиоактивных отходов

ПИЛ — подземная исследовательская лаборатория

ПКУ — программа комплексной утилизации

ПН — проектное направление

ПрЭВМ — программа для ЭВМ

ПС — программное средство

ПТК — программно-технический комплекс

РАО — радиоактивные отходы

РБ — радиационная безопасность

РБМК — реактор большой мощности канальный

РВ — радиоактивные вещества

РИД — результат интеллектуальной деятельности

РИНЦ — российский индекс научного цитирования (библиометрическая база данных)

РКО — расчетный комплекс оптимизации

РПК — расчетно-прогностический комплекс

РУ — реакторная установка

САОЗ НД — часть низкого давления системы аварийного охлаждения активной зоны

САПР — система автоматизированного проектирования (CAD)

СДР — структура декомпозиции работ

СЗЗ — санитарно-защитная зона

СМП — Стратегический мастер-план

СНУП топливо — смешанное нитридное уран-плутониевое топливо

СУБД — система управления базами данных;

СХД — система хранения данных

СХК — АО «Сибирский химический комбинат» (г. Северск)

ТВС — тепловыделяющая сборка

твэл — тепловыделяющий элемент

ТЖМТ — тяжелый жидкометаллический теплоноситель

ТКВ — Теченский каскад водоемов

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

ТОФ — Тихоокеанский флот

ТУК — транспортно-упаковочный контейнер

ТЯУ — термоядерная установка

ФААЭ — Федеральное агентство по атомной энергии (в 2004—2008 гг.; преобразовано в ГК «Росатом»)

ФМБЦ ФМБА — Федеральный медико-биологический центр им. А.И. Бурназяна Федерального медико-биологического агентства России (г. Москва)

ФГУП «НО РАО» — Федеральное государственное унитарное предприятие «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами» (г. Москва)

ФНП — федеральные нормы и правила

ФЦП — Федеральная целевая программа

ФЦП ЯРБ-2 — Федеральная целевая программа «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016 – 2020 годы и на период до 2030 года»

ЦИМ — цифровая информационная модель

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

ЯЭУ — ядерная энергетическая установка

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ БЕЗОПАСНОГО РАЗВИТИЯ
АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
115191, Россия, г. Москва, Большая Тульская ул., д. 52
pbl@ibrae.ac.ru
www.ibrae.ac.ru