



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



ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТ

за **2022** год



ИБРАЭ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ

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

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТ

за **2022** год

УДК 621.039

ББК 31.4

075

Основные результаты работ за 2022 г. / Под общ. ред. акад. РАН Л. А. Большова; Ин-т проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук (ИБРАЭ РАН). — М., 2023. — 134 с. : ил. — ISBN 978-5-907375-12-3.

Настоящий годовой отчет представляет собой обзор основных направлений научно-исследовательской и научно-организационной деятельности ИБРАЭ РАН за 2022 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 2022 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 978-5-907375-12-3



Большов Леонид Александрович

академик РАН,
научный руководитель ИБРАЭ РАН

Дорогие читатели!

Вашему вниманию предлагается отчет ИБРАЭ РАН по результатам его деятельности в 2022 году.

Коллектив Института вновь подтвердил свой научный, созидательный потенциал, продемонстрировав сплоченность, неизменный интерес к работе, стремление и умение преодолевать трудности.

Результаты работ сотрудников ИБРАЭ 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 российская система радиационного мониторинга и аварийного реагирования на ЧС с радиационным фактором и делается многое, многое другое.

ИБРАЭ широко продвигает современный подход, ориентированный на цифровизацию решений в области комплексного планирования задач вывода из эксплуатации ОИАЭ и оптимизации обращения с РАО; в рамках данного подхода были созданы цифровые информационные модели ряда объектов российской атомной отрасли и продолжались разработка и подготовка к практическому внедрению линейки программных комплексов для решения задач ЗСЖЦ.

В 2022 году выпущена пилотная версия интегрального кода TITAN-RBMK/V2.1 для численного расчёта аварийных процессов на энергоблоках с РУ RBMK-1000, включая стадию тяжёлой запроектной аварии.

Продолжились разработка и подготовка к валидации программы для расчётного анализа тяжёлых аварий (ТА) для атомных станций малой мощности (АСММ) с РУ «РИТМ-200».

Институт активно включился в работу по созданию нового программного инструментария и развитию законодательно-нормативной базы в области безопасного использования атомной энергии в рамках федерального проекта «Разработка технологий управляемого термоядерного синтеза (УТС) и инновационных плазменных технологий», направленного на решение задач освоения термоядерной энергии. Уже получены важные результаты на этом пути: разработаны компьютерные коды для описания миграции трития в технологических системах ОНЯТ и оценки радиационных характеристик материалов для установок управляемого термоядерного синтеза.

Мы научились работать на удаленке, сочетая живое обсуждение хода работы, планов и результатов с общением с сотрудниками других организаций в ходе видеоконференций. Для их проведения в Институте создана современная система видеоконференцсвязи. В 2022 году продолжились работы по развитию нового вычислительного кластера. Сегодня суммарный объем вычислительных мощностей в Институте составляет уже порядка 290 Тфлопс, и мы планируем дальнейшее его увеличение.

Активно работали наши образовательные структуры в МФТИ и МИФИ, проводились защиты диссертаций на Диссертационном совете в гибридном (очном/заочном) формате с использованием системы ВКС.

Институт, как и в предыдущие годы, вносит большой вклад в развитие международного сотрудничества в атомной сфере. Специалисты ИБРАЭ РАН в 2022 г. приняли участие более чем в 30 различных мероприятиях МАГАТЭ. Сотрудники Института активно участвовали в работе XII Международного форума «АТОМЭКСПО 2022», крупнейшей международной конференции «Быстрые реакторы и связанные с ними топливные циклы: устойчивая чистая энергия будущего (FR22)», обеспечивали подготовку и экспертную поддержку Национального доклада Российской Федерации, представленного в ходе 7-го Совещания Договаривающихся сторон в штаб-квартире МАГАТЭ.

Основные результаты, полученные в 2022 году, представлены в настоящем отчете. В нем акцент сделан на фактически выполненных в 2022 году исследованиях и разработках, которые уже в текущем году будут внедрены в практику или продолжат дальнейшее совершенствование.

Я хочу, пользуясь случаем, еще раз поблагодарить своих коллег за проделанную работу и отметить их вклад в достижения Института.

С уважением,



Л. А. Большов

1

2

3

4

5

6



Матвеев Леонид Владимирович

д.ф.-м.н.

директор ИБРАЭ РАН

Уважаемый читатель!

В данном отчёте Вашему вниманию предлагаются основные результаты работы ИБРАЭ РАН за 2022 год. Одним из приоритетных направлений деятельности Института является развитие кодов нового поколения. В рамках проектного направления «Прорыв» выпущена версия твэльного кода БЕРКУТ-У/V2, содержащая доработанные усовершенствованные модели топлива и оболочки, проведена его валидация на результатах послереакторных исследований твэлов со СНУП топливом. Подготовлены новая версия и материалы для аттестации нейтронно-физического кода на базе методов конечных элементов и дискретных ординат ODETTA. Разработана учебная версия кода COMPLEX.

В поддержку развития кодов нового поколения в Новосибирском филиале ИБРАЭ РАН совместно со специалистами ИТ СО РАН проведены исследования двухфазных течений тяжелого жидко-металлического теплоносителя и течений с вынужденной/естественной конвекцией, близких по критериям подобия течению ТЖМТ в реальной РУ.

Выпущена версия интегрального кода TITAN-RBMK/V2.1 для описания процессов на энергоблоках с реакторной установкой RBMK-1000. Разработана, валидирована и аттестована программа для ЭВМ SFPSim/V2.0, предназначенная для расчётного анализа последствий аварий с потерей охлаждения в бассейнах выдержки АЭС с РУ ВВЭР.

За истекший год получены важные результаты в рамках проблемы безопасности ОНЯТ в области термоядерных технологий. Разработаны код для описания миграции трития TRITIUM-F в технологических системах ОНЯТ и код нуклидной кинетики TRACT-F для оценки радионуклидных составов и радиационных характеристик материалов установок управляемого термоядерного синтеза; код TRITIUM-F передан для опытной эксплуатации в АО «НИКИЭТ». В рамках работы по развитию законодательной и нормативной базы разработаны концепция и проект соответствующего Федерального закона.

Успешно завершена экспертиза в Ростехнадзоре Отчёта о верификации Программы для ЭВМ (ПрЭВМ) СОКРАТ-V1/V2, что позволяет использовать всю линейку версий ПрЭВМ СОКРАТ в проектных работах по обоснованию безопасности АЭС с ВВЭР как в России, так и за рубежом. В рамках разработки нового кода для расчётного анализа тяжёлых аварий для атомных станций малой мощности (АСММ) впервые определен перечень ключевых процессов и явлений и сформирован общий вид матрицы верификации и валидации будущей ПрЭВМ.

Продолжаются работы по развитию системы УРАНИЯ и разработке расчетных комплексов (РКО) для решения оптимизационных задач и выполнения параметрических исследований. РКО по теплогидравлике успешно прошёл приёмочные испытания, планируется его внедрение в АО НИКИЭТ в рамках ПН «Прорыв».

В области обеспечения безопасности населения и аварийного реагирования на угрозы радиационного характера продолжились работы по совершенствованию моделей атмосферного переноса радионуклидов и применению этих моделей для решения задач по обоснованию вывода из эксплуатации ОИАЭ. Выполнены оценки возможного радиологического воздействия на население при планируемых работах по демонтажу объектов, находящихся на заключительных стадиях жизненного цикла. Ведутся разработки автономных программно-аппаратных комплексов контроля радиационной обстановки, а также миниатюрных дозиметров гамма-излучения для БПЛА. Начаты работы по модернизации программно-технической инфраструктуры в ЦНТП ИБРАЭ РАН. Значимым результатом 2022 года стало создание Аварийно-технического центра Объединенного института ядерных исследований в г. Дубне.

Проведен анализ гипотетических аварий на объектах атомфлота, в том числе с целью оценки безопасности развития Севморпути. Продолжены работы по дальнейшему развитию информационной системы управления проектами (ИСУП) по повышению радиационной безопасности на объектах РАН. В базе данных актуализирована информация по 59 организациям РАН и 22 вузам.

В 2022 году особое внимание было уделено созданию и совершенствованию цифровых инструментов для решения задач комплексного планирования и оптимизации ВЭ и обращения с РАО; были построены цифровые информационные модели (ЦИМ) для объектов в Северске, Новосибирске, Кирово-Чепецке, Сергеевом Посаде. Реализованы мероприятия по продлению ФЦП ЯРБ-2 в аспекте уточнения целевых показателей. В рамках обеспечения публичности мероприятий в сфере ЯРБ проведены технические туры на ряд объектов атомной отрасли, в которых приняли участие 80 экспертов, представителей общественности и СМИ. Выполнены работы по подготовке и сопровождению Шестого национального Доклада Российской Федерации по обязательствам, вытекающим из Объединенной конвенции о безопасности обращения с отработавшим топливом и радиоактивными отходами, а также по экспертной поддержке делегации Российской Федерации в ходе седьмого Совещания Договаривающихся сторон, состоявшегося в 2022 году в штаб-квартире МАГАТЭ.

Продолжены работы по доизучению площадки ПИЛ совместно с профильными институтами РАН, АО «Красноярскгеология» и др. Продолжается развитие расчетно-прогностических комплексов FENIA, RELTRAN, GeRa, KORIDA, MOUSE, охватывающих весь спектр практических потребностей численно-го обоснования безопасности.

Получены новые фундаментальные результаты в области разработки численных схем для решения задачи Коши для эволюционных уравнений первого и второго порядка с памятью. Активно велись работы по CFD моделированию: адаптация двухфазного CFD кода к суперэвм эксафлопсной производительности (конечная цель — DNS тепловыделяющих сборок а. з. РУ), CFD расчёты пассивного каталитического рекомбинатора (в рамках поддержки экспериментов). Развита модель двумерного течения жидкости в слое, стратифицированном по солёности. Разработаны методы моделирования гидродинамических течений с учетом реальных глубин и береговой линии для ряда областей. В рамках задач оперативной океанологии выполнено обобщение 2D — 3D для квадросеток со сгущениями и решение на этих сетках уравнений гидродинамики.

Также в рамках фундаментальных исследований следует отметить развитие асимптотического метода для решения уравнений переноса с адвекцией, новые результаты в теории квантовой и классической динамики систем частиц со спином и дипольным моментом, исследования на стыке низкоэнергетической ядерной физики, физики высокотемпературной лазерной плазмы и квантовой оптики с целью разработки нового стандарта времени на базе ^{229}Th .

Как и прежде, особое внимание руководство ИБРАЭ уделяет развитию вычислительных и коммуникационных сетей Института. Созданы серверы централизованной работы сотрудников, распределенной системы управления версиями (Git), корпоративных коммуникаций (eXpress); расширены функциональные возможности централизованной системы видеоконференцсвязи ИБРАЭ РАН, реализована поддержка полностью удалённых решений.

Институт активно ведет международную, научно-образовательную и издательскую деятельность. В ИБРАЭ проводится обучение студентов на кафедрах «Проблем безопасного развития современных энергетических технологий» МФТИ и «Технологии замкнутого ядерного топливного цикла» НИЯУ МИФИ. Научные и информационно-аналитические журналы «Арктика: экология и экономика» и «Радиоактивные отходы», учредителем и издателем которых является ИБРАЭ РАН, в 2022 году занимали высокие места в рейтинге научных журналов по данным РИНЦ и индексировались в ведущих международных наукометрических базах данных; стабильно растет посещаемость интернет-ресурсов Института.

По итогам года можно сделать обоснованный вывод что Институт продолжает своё успешное поступательное развитие, занимая ведущие позиции на переднем крае российской науки, а его деятельность является очень актуальной и широко востребованной научным сообществом и предприятиями атомной отрасли.

Далее в отчёте представлены основные результаты работ за 2022 год, структурированные по направлениям.

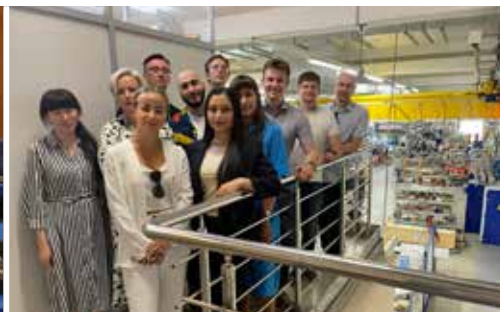


Л. В. Матвеев

Содержание



| | |
|--|----|
| 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ИБРАЭ РАН | 8 |
| Коллектив и структура Института в 2022 году..... | 9 |
| Направления научно-исследовательской деятельности Института..... | 12 |
| 2. ОСНОВНЫЕ ИТОГИ РАБОТ В 2022 ГОДУ | 14 |
| 2.1. БЕЗОПАСНОСТЬ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ | 15 |
| Разработка программного обеспечения для анализа безопасности атомных станций..... | 15 |
| Анализ безопасности ядерных энергетических установок..... | 29 |
| Расчетно-экспериментальные исследования теплофизических процессов в ядерных установках..... | 34 |
| Информационные технологии управления жизненным циклом объектов атомной энергетики..... | 39 |
| 2.2. БЕЗОПАСНОСТЬ ЗАВЕРШАЮЩИХ СТАДИЙ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ОБЪЕКТОВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ И НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ | 44 |
| Информационная поддержка разработки и реализации программ в сфере ЯРБ..... | 44 |
| Научное обеспечение завершающей стадии жизненного цикла объектов ядерной техники..... | 55 |
| Стратегическое планирование и проектное управление в области радиационной безопасности..... | 66 |
| 2.3. БЕЗОПАСНОСТЬ НАСЕЛЕНИЯ | 74 |
| Развитие систем радиационного мониторинга, аварийной готовности и реагирования..... | 74 |



| | |
|---|-----|
| 2.4. РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ | 83 |
| Численные методы и вычислительные алгоритмы..... | 83 |
| Теоретическая физика | 93 |
| 3. РАЗВИТИЕ ИНФРАСТРУКТУРЫ | 104 |
| 4. МЕЖДУНАРОДНОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО | 106 |
| 5. НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ И ИЗДАТЕЛЬСКАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ..... | 116 |
| Профильные кафедры..... | 116 |
| Кафедра проблем безопасного развития современных энергетических технологий МФТИ | 116 |
| Кафедра «Технологии замкнутого ядерного топливного цикла» НИЯУ МИФИ..... | 119 |
| Аспирантура..... | 120 |
| Диссертационный совет..... | 120 |
| Издательская деятельность..... | 121 |
| Журнал «Радиоактивные отходы» | 122 |
| Журнал «Арктика: экология и экономика» | 123 |
| 6. ОБЩЕСТВЕННЫЕ ОРГАНИЗАЦИИ..... | 127 |
| Совет молодых ученых и специалистов..... | 127 |
| Первичная профсоюзная организация ИБРАЭ РАН..... | 129 |
| СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ..... | 130 |

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.

За 35 лет своего существования Институт выполнял крупные комплексы работ в интересах российских ведомств и организаций. Среди них МЧС России, Минатом России, Минобрнауки России, Госкорпорация «Росатом», Ростехнадзор, АО «Концерн Росэнергоатом».

Зарубежными заказчиками работ Института в разные годы выступали: Комиссариат по атомной энергии и Институт радиационной защиты и ядерной безопасности (Франция), Департамент энергетики и Комиссия по ядерному регулированию (США), Ядерный исследовательский центр в Карлсруэ (Германия), Международное агентство по атомной энергии.

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

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

- развитие научных основ расчетно-экспериментального моделирования поведения ядерных установок в запроектных режимах работы;
- анализ тяжелых аварий на АЭС и обоснование технических решений по локализации расплава ядерного топлива;
- обоснование оптимальных режимов функционирования защитных оболочек 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 государственными, ведомственными и научными наградами, в том числе премиями Правительства Российской Федерации в области науки и техники, международной энергетической премией «Глобальная энергия»;

- **17** ученых Института удостоены государственных наград Российской Федерации, среди которых ордена Александра Невского, Почета, Мужества, Дружбы, «За заслуги перед Отечеством» III и IV степени, медаль ордена «За заслуги перед Отечеством» II 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—2022 годах ИБРАЭ РАН неизменно входил в первую категорию научных организаций.



КОЛЛЕКТИВ И СТРУКТУРА ИНСТИТУТА В 2022 ГОДУ

По состоянию на 1 января 2023 года общая штатная численность ИБРАЭ РАН составляла **569** человек, в том числе **422** сотрудников научных подразделений. Среди них: **3** академика РАН, **1** член-корреспондент РАН, **43** доктора наук и **121** кандидат наук.

В Новосибирском филиале ИБРАЭ РАН работало **18** человек, в том числе **15** сотрудников научных подразделений, среди которых **1** член-корреспондент РАН, **3** доктора наук и **2** кандидата наук.

В сентябре 2021 года был открыт Красноярский филиал ИБРАЭ РАН (в г. Железногорск), в котором работали **7** сотрудников, в том числе **2** кандидата наук.

569

СОТРУДНИКОВ НАУЧНЫХ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ, СРЕДИ НИХ:

3

АКАДЕМИКА РАН

1

ЧЛЕН-КОРРЕСПОНДЕНТ РАН

43

ДОКТОРА НАУК

121

КАНДИДАТ НАУК



Заместитель директора
по экономике
и финансам

О. В. Цацулина

ovts@ibrae.ac.ru

В структуре Института можно выделить три блока подразделений:

БЛОК ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЕЙ И РАЗРАБОТЧИКОВ

Существующая структура исследовательских подразделений сформировалась под воздействием многих факторов, в том числе принятых в Академии наук традиций преемственности, и постоянно развивающейся системы требований к повышению эффективности научной деятельности. Исследовательские подразделения представляют собой нерегулярную структуру в составе:

- 6 отделений, в состав которых входят как совокупности отделов, включающих в себя лаборатории, так и отдельные исследовательские лаборатории;
- 3 самостоятельных отдела;
- лаборатория теоретической физики.

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. В настоящее время ЦНТП ИБРАЭ РАН является единственным в Российской Федерации кризисным центром, решающим полный перечень задач по обеспечению научно-технической поддержки аварийного реагирования органов власти при нештатных/чрезвычайных ситуациях с радиационным фактором: от анализа и оценки аварийных технологических процессов на ОИАЭ до разработки рекомендаций по мерам защиты персонала, населения и окружающей среды.

Основные итоги работ научных подразделений представлены в разделе 2 настоящего Отчета.

БЛОК ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ ФИНАНСОВОГО, КАДРОВОГО И ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Контактная служба вместе с договорным, финансовым и юридическим отделами в 2022 году обеспечили участие Института в более чем 70 конкурсных процедурах, заключено более 50 контрактов с заказчиками на выполнение работ (НИР, НИОКР и др.), а также проведено порядка 250 конкурентных процедур на оказание услуг, закупку оборудования и материалов.



Заместитель директора по информационным технологиям и техническому обеспечению

В. Н. Лазарев
(laz@ibrae.ac.ru)



Заместитель директора по общим вопросам

П. А. Крестьянинов
(account@ibrae.ac.ru)

Программа обеспечения качества реализует своевременное и качественное исполнение контрактов и лицензионную готовность Института.

Службы технического обеспечения 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;

Вопросы развития материально-технической базы 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 Института к российским и международным информационным ресурсам, в том числе к ведущим международным и российским наукометрическим базам данных;
- работу Диссертационного совета (вплоть до конца 2022 г. — Д 002.070.01; с июня 2023 г. — 24.1.496.01) 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, сборников публикаций конкурсов молодых учёных ИБРАЭ РАН, учебных пособий по кодам нового поколения в рамках реализации проекта «Коды нового поколения» проектного направления «Прорыв»;
- подготовку к публикации и издание научно-технических информационно-аналитических журналов «Арктика: экология и экономика» и «Радиоактивные отходы»;
- администрирование и обеспечение контентом интернет-сайта ИБРАЭ РАН.

Основные итоги работ по указанным направлениям представлены в разделах 4 и 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 2022 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, а также информационная и технологическая поддержка работ по ВЭ ЯРОО;
- инфраструктурное и научное обеспечение реализации программы исследований подземной лаборатории, создаваемой ФГУП «НО РАО»;
- исследования радиоэкологических проблем Арктической зоны Российской Федерации;
- долгосрочное планирование и реализация мероприятий по повышению радиационной безопасности организаций Российской академии наук.

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

- фундаментальные и прикладные исследования по моделированию распространения радионуклидов в атмосфере;
- комплексный анализ радиационных последствий аварий с учетом неопределенностей;
- обоснование радиационной безопасности населения при выводе из эксплуатации ОИАЭ
- разработка аппаратных и программных средств, информационных систем для решения задач радиационного мониторинга и оценки возможных последствий аварийных ситуаций радиационного характера;
- обеспечение через ЦНТП 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.

2

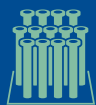
Основные итоги работ научных подразделений ИБРАЭ РАН в 2022 году



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);

В. П. Березнев, к.т.н. — разработка нейтронно-физических кодов на базе метода дискретных ординат, выполнение реакторных расчётов и расчётов радиационной защиты (bvp@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);

Д. П. Вепрев — разработка и применение программных комплексов для мультифизического моделирования реакторных установок на быстрых нейтронах (veprev@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 расчёта нейтронно-физических характеристик реакторных установок (kda@ibrae.ac.ru);

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

Е. В. Моисеенко, к.ф.-м.н. — разработка методов анализа неопределённостей и чувствительности для валидации программных комплексов и обоснования безопасности объектов использования атомной энергии (moi@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);

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).

ОСНОВНЫЕ 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 РАСЧЁТНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭНЕРГБЛОКА С РУ БР-1200 И ИНТЕГРАЛЬНОЙ РАСЧЁТНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОДЭК С РУ БРЕСТ-ОД-300
- 3 РАЗРАБОТКА, ВАЛИДАЦИЯ И АТТЕСТАЦИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ РАСЧЁТНЫХ КОДОВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ АЭС С РЕАКТОРНЫМИ УСТАНОВКАМИ ТЕХНОЛОГИИ ВВЭР И РБМК, ВКЛЮЧАЯ ВОЗМОЖНОСТЬ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЯЖЁЛЫХ АВАРИЙ
- 4 ВЫПОЛНЕНИЕ РАСЧЁТОВ АЭС С РЕАКТОРНЫМИ УСТАНОВКАМИ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ ИХ БЕЗОПАСНОСТИ ИЛИ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНЫХ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ
- 5 РАЗРАБОТКА МЕТОДИК, МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И РАСЧЁТНЫХ КОДОВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ И КОНТРОЛЯ 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
- 7 РАЗРАБОТКА И РАЗВИТИЕ РАСЧЁТНЫХ ПРОГРАММ ДЛЯ ЗАДАЧ ОБОСНОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ОНЯТ В ОБЛАСТИ БАЗОВЫХ ТЕРМОЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

ОСНОВНЫЕ ИТОГИ 2022 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»):

- выпущена версия твэльного кода **БЕРКУТ-У/V2**, содержащая доработанные усовершенствованные модели оболочки твэла и топлива. В состав новой версии кода вошли: доработанная модель эволюции элементного и изотопного состава материала оболочки с возможностью расчёта повреждающей дозы и скорости генерации дефектов в матрице; доработанная модель эволюции дефектной подсистемы материала оболочки; дополнительные модели для описания нуклеации газонаполненных пузырьков на дислокациях, а также радиационного перерастворения атомов гелия из газонаполненной пористости при нейтронном облучении; модифицированная модель для учёта процессов релаксации газонаполненных пузырьков, зеренной структуры материала оболочки и наличия в нем возможных включений; доработанные диффузионные модели, описывающие процессы азотирования и науглероживания стали. Возможности кода БЕРКУТ-У/V2 позволяют описывать **важнейшие процессы, протекающие в материале оболочки твэла под облучением:**

- генерацию точечных дефектов в нейтронном потоке, их рекомбинацию (спонтанную и диффузионную), тепловую генерацию вакансий;
- генерацию атомов гелия в нейтронном потоке и их взаимодействие с точечными дефектами;
- нуклеацию и рост межзельных петель;
- нуклеацию газонаполненных пузырьков в матрице и на дислокациях;
- захват точечных дефектов и межзельных атомов гелия дислокациями и газонаполненными пузырьками;
- радиационно-индуцированное перерастворение атомов гелия из пузырьков;
- сток точечных дефектов на границу зерен, пузырьки и нейтральные стоки;
- сток межзельных атомов гелия на границу зерен и формирование там межзеренных пузырьков.

Выполнена **валидация кода** на результатах послереакторных исследований твэлов ЭТВС-8, 9, 10, 12 и 16 со СНУП топливом, облученных в РУ БН-600 (рис. 2.1.1). Показано, что расчётные и экспериментальные данные по профилям концентраций азота и углерода в оболочках твэлов находятся в удовлетворительном согласии с учётом разброса данных измерений. Относительная погрешность меняется в зависимости от расстояния до внутренней поверхности оболочки. Отличия расчётных значений от экспериментальных находятся в пределах двух среднеквадратичных отклонений измеренных величин (абсолютное значение порядка 0,1 %).

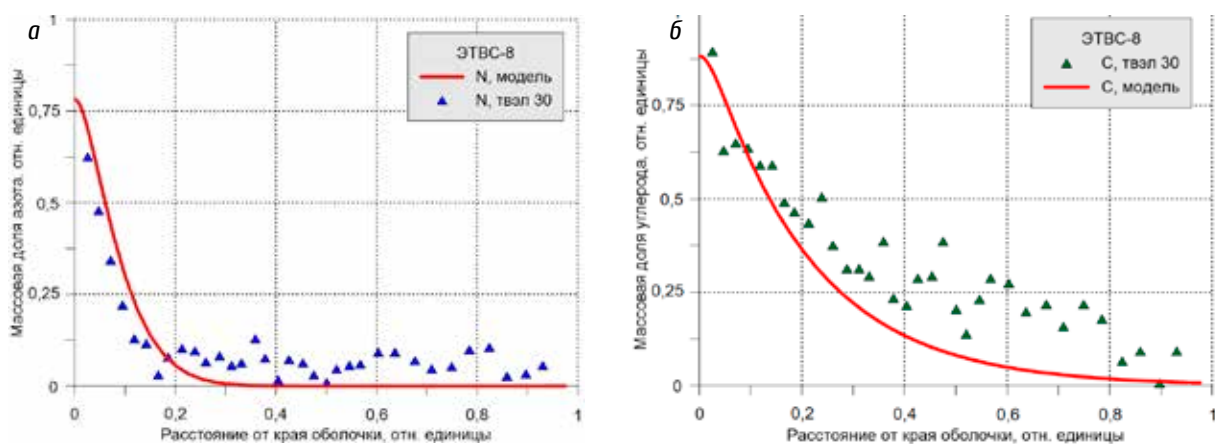


Рис. 2.1.1 – Сравнение расчётных и измеренных концентраций азота и углерода в оболочке твэла №30 ЭТВС-8
 а) профиль концентрации азота в оболочке твэла 30 ЭТВС-8; б) профиль концентрации углерода в оболочке твэла 30 ЭТВС-8

► В 2023 году запланированы доработка и реализация моделей образования и эволюции дефектов в материале оболочки твэла, включение в код корреляционных соотношений, связывающих рассчитанные параметры дефектной структуры с прочностными характеристиками оболочечных сталей, а также разработка пэльного кода БЕРКУТ-ПЭЛ для моделирования поведения пэлов быстрых реакторов.

- выполнена адаптация двухфазного **CFD кода CONV-3D/TwoPhase** для расчёта процессов тепло- и гидродинамики в двухфазной среде к суперЭВМ экзафлопсной производительности.

При адаптации двухфазного CFD модуля необходимо иметь различные версии кода для запуска на различных архитектурах суперЭВМ. В 2022 году была разработана **новая версия двухфазного CFD модуля CONV-3D/TwoPhase на языке CUDA**, предназначенном для выполнения расчётов на ускорителях от NVIDIA, используемых в большинстве

существующих систем. Проведенные тесты показали, что новая CUDA версия имеет лучшие показатели как сильной, так и слабой масштабируемости по сравнению с разработанной ранее OpenCL версией (рис. 2.1.2). В ходе тестов новой CUDA версии на суперкомпьютере «Ломоносов-2» не было зафиксировано снижения скорости работы обменов на маленьких расчётных сетках, что было свойственно предыдущей OpenCL версии. Тестирование на суперкомпьютере «Ломоносов-2» проводилось на последовательности сеток от 100 тысяч до 8,3 миллионов точек на 16-ти узлах. Можно прогнозировать, что при запуске на всех узлах суперкомпьютера (СК) FRONTIER (США), единственного в мире суперкомпьютера, который показал производительность более эксафлопса на стандартных тестах, максимальная сетка составит около 300 миллиардов точек, что позволит моделировать тепловыделяющие сборки а. з. реакторных установок на основе методов прямого численного моделирования (DNS).

В связи с разнообразием суперкомпьютерных архитектур предполагается далее развивать обе версии двухфазного модуля — **OpenCL** и **CUDA**. Версия OpenCL уже сейчас позволяет проводить вычисления на системах вплоть до эксафлопсной производительности, построенных на решениях от AMD и Intel, однако, возможно, с более низкой эффективностью по сравнению с CUDA версией кода.

► В 2023 году планируется перевести тексты двухфазного модуля на язык HIP, развиваемый компанией AMD для работы на графических ускорителях собственного производства. Выполненные работы позволят проводить вычисления на разных суперкомпьютерных архитектурах.

- подготовлены для аттестации обосновывающие материалы и версия нейтронно-физического кода на базе методов конечных элементов и дискретных ординат **ODETTA**. По сравнению с аттестованной ранее версией (аттестационный паспорт №497 от 19.12.2019 г.) выполнено обоснование кода в части переноса ней-

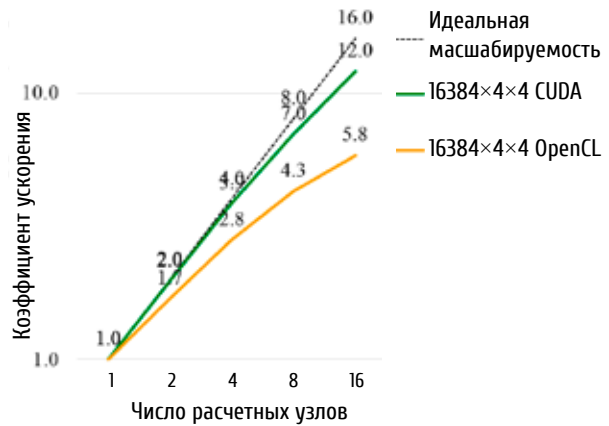


Рис. 2.1.2 – Сильная масштабируемость CUDA и OpenCL версий двухфазного модуля

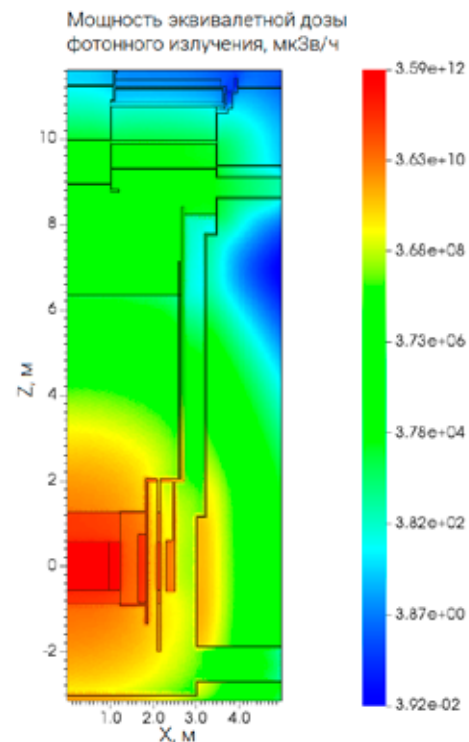


Рис. 2.1.3 – Мощность эквивалентной дозы фотонного излучения в тестовой модели РУ БРЕСТ-ОД-300

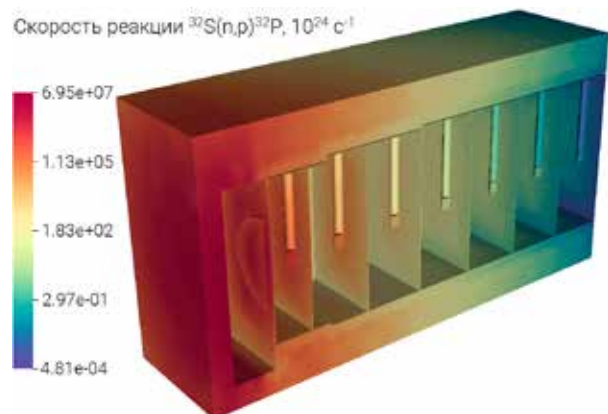


Рис. 2.1.4 – Распределение скорости реакции $^{32}\text{S}(n,p)^{32}\text{P}$ в эксперименте Ispra Sodium

тронно-фотонного и фотонного излучения, расширены перечень рассчитываемых параметров (мощность эквивалентной дозы, удельное тепловыделение) и перечень ОИАЭ (радиационная защита РУ БРЕСТ-ОД-300 (рис. 2.1.3) и РУ БР-1200; элементы конструкций и радиационной защиты РУ БН-600, БН-800 и РУ БН-1200М (облученные сборки стальной защиты, натриевый трубопровод, облучательные устройства, незащищенные ТВС); транспортно-упаковочные контейнеры). Валидационные расчёты экспериментов из базы **SINBAD** выполнены на актуализированных геометрических и сеточных моделях. В результате максимальное отклонение от экспериментальных значений удельных скоростей реакции для эксперимента **IRON 88** снижено с **91%** до **48%**, для эксперимента **JANUS Phase I** оно снизилось с **60%** до **48%**, для эксперимента Winfrith Graphite — снизилось с **35%** до **29%**, для эксперимента **Ispra Sodium** (рис. 2.1.4) — снизилось с **18%** до **14%**.

- разработаны учебное пособие (рис. 2.1.5) и учебная версия кода **COMPLEX** (рис. 2.1.6). Код предназначен для расчётного обоснования радиационной безопасности при обращении с топливными и радиоактивными материалами на АЭС, объектах топливного



Рис. 2.1.5 – Обложка учебного пособия кода COMPLEX/E1.0

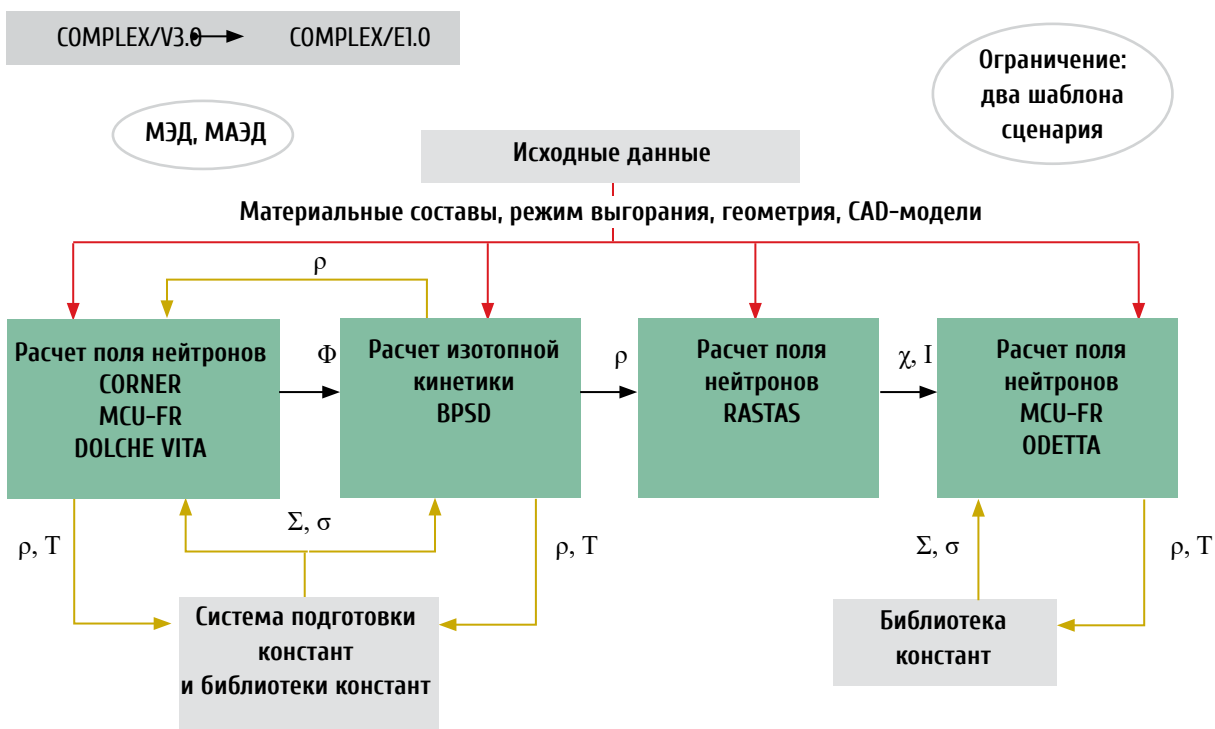


Рис. 2.1.6 – Блок-схема кода COMPLEX/E1.0

цикла и при логистике. По сравнению с полной версией кода в учебной версии были доработаны конвертер данных между модулями **CORNER — BPSD**, алгоритм построения сценария с использованием 4 расчётных модулей и внесены изменения в графическую оболочку **COMPLEX-GUI**. В учебном пособии кратко описаны модели и подходы, реализованные в учебной версии кода COMPLEX, приведена инструкция по работе в графической оболочке кода. Также в учебном пособии подробно разобраны две задачи. В первой задаче рассчитывается перенос фотонов от источника ^{60}Co через бетонную защиту (задействованы два модуля: **RASTAS** и **ODETTA**). Вторая задача посвящена расчёту мощности амбиентного эквивалента дозы (МАЭД) от транспортного контейнера КТ-340, содержащего облученную экспериментальную ТВС. Моделирование кампании ТВС осуществляется при помощи нейтронно-физического реакторного кода **CORNER** и кода нуклидной кинетики **BPSD**. Расчёт источника радиоактивного излучения проводится по модулю RASTAS. Перенос нейтронов и оценка МАЭД моделируются по прецизионной программе **MCU-FR**.

▶ В апреле 2023 года в рамках школы-семинара по кодам нового поколения запланировано проведение курса лекций и практических занятий, посвященных учебной версии кода COMPLEX. Для полной версии кода COMPLEX в 2023 году будут развиты средства создания расчётных моделей.

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

В 2022 году выпущена версия интегрального кода **TITAN-RBMK/V2.1**, предназначенная для описания процессов на энергоблоках с реакторной установкой РБМК-1000 в условиях нормальной эксплуатации, нарушений нормальной эксплуатации, при проектных и запроектных авариях. Программа TITAN-RBMK/V2.1 позволяет проводить теплогидравлический расчёт элементов контура охлаждения энергоблока с РУ РБМК-1000, теплофизический и термомеханический расчёт твэлов, труб технологических каналов и графитовой кладки, моделирование поведения продуктов деления, термомеханических процессов в активной зоне и окружающих металлоконструкциях, а также разрушения элементов активной зоны и взаимодействия расплава с подреакторными конструкциями и бетоном (рис. 2.1.7).

В состав интегрального кода входит программный модуль **RBMK-TM**, включающий два расчётных ядра на основе алгоритмов метода конечных элементов в нестационарной нелинейной постановке и соответствующие расчётные модели для решения следующих задач:

- **RBMK-T** для расчёта температурных полей на обобщенной трехмерной модели, включающей модель графитовой кладки и окружающих металлоконструкций («ОР», «Л», «Д», «КЖ», «Е», «С»);
- **RBMK-M** для расчёта напряженно-деформированного состояния металлоконструкций схемы «ОР» на более подробной трехмерной модели, точно отражающей геометрию и состав материалов реальной конструкции.

Результаты расчётов, полученные с применением разработанных расчётных моделей, могут быть использованы для оценки работоспособности металлоконструкций РУ РБМК-1000 по критериям достижения предельно допустимых температур и/или по критериям прочности.

По интегральному коду TITAN-RBMK/V2.1 был выполнен демонстрационный расчёт разрушения одного топливного канала (ТК). Рассматривался сценарий с полной блокировкой расхода теплоносителя в ТК при работе реактора на номинальной мощности. Основные характерные времена демонстрационной задачи представлены в табл. 1.

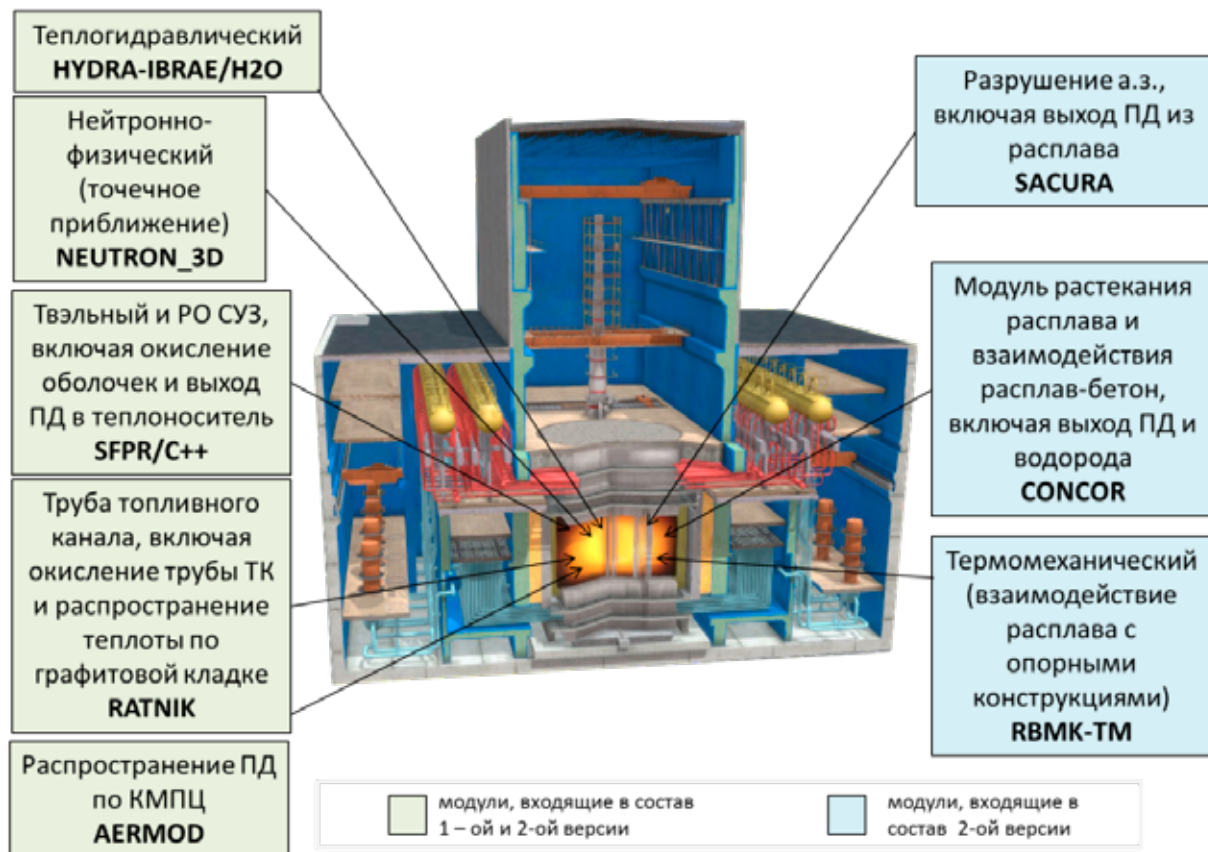


Рис. 2.1.7 – Модульный состав кода TITAN-RBMK/V2.1 (Источник рисунка «3D-модель реактора РБМК-1000»: <https://iz.ru/737014/2018-04-26/3d-model-reaktora-rbmk-1000>)

Табл. 1 — Характерные времена тестовой задачи моделирования разрушения ТК

| Событие | Время, с |
|---|----------|
| Начало плавления оболочки твэла внутреннего и внешнего ряда ТВС | 23 |
| Начало стекания оболочки твэла внутреннего и внешнего ряда ТВС | 30 |
| Начало образования металлической блокады (перемещение и затвердевание материала оболочек на трубе ТК) | 1132 |
| Начало плавления центрального стержня | 5310 |
| Начало плавления топлива внутреннего ряда ТВС | 10560 |
| Начало плавления топлива внешнего ряда ТВС | 10562 |
| Начало образования оксидной блокады (перемещение и затвердевание материала топлива на трубе ТК) | 13668 |

Результаты разрушения одного топливного канала были использованы для моделирования разрушения а.з. с общим числом топливных каналов 1671. Расчёт выполнялся в предположении, что расплав поступает на схему «ОР» сверху, проплавливая опорные стаканы. Достигнув схемы «ОР», кориум растекается по ней до вертикальной границы и начинает с ней взаимодействовать. На схему «ОР» действуют нагрузки от собственного веса и веса вышележащих конструкций. Моделируется продвижение кориума внутрь схемы «ОР».

На рис. 2.1.8 приведена форма каверны схемы «ОР» на момент завершения расчёта. На рис. 2.1.9 показана расплавленная часть металлоконструкций схемы «ОР». Значения выше 0 означают переход элемента в расплавленную зону. На рис. 2.1.10 показано распределение интенсивности напряжений в элементах металлоконструкций схемы «ОР», не перешедших в зону расплава, на момент завершения расчёта.

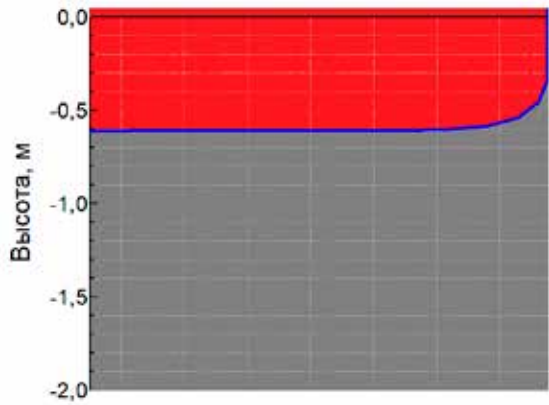


Рис. 2.1.8 — Форма каверны схемы «ОР» в конце расчёта с расплавлением всех ТК

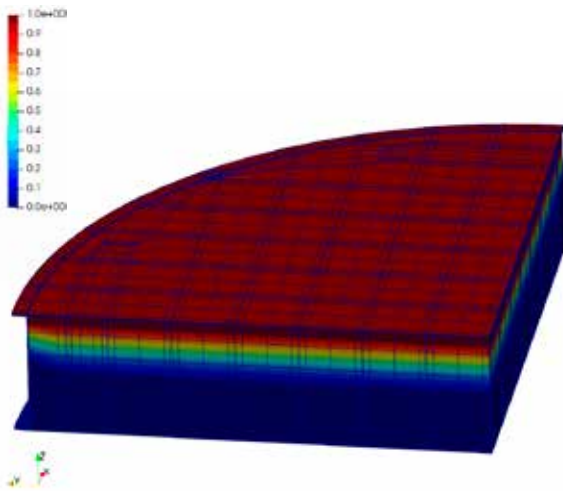


Рис. 2.1.9 — Зона проникновения расплава внутрь МК «ОР»

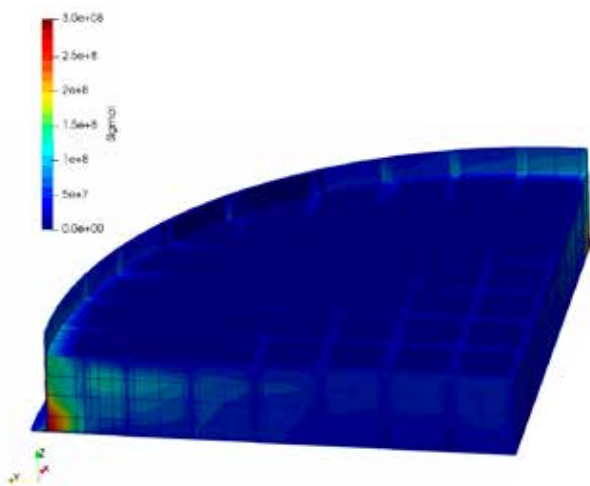


Рис. 2.1.10 — Интенсивность напряжений в элементах МК «ОР», не перешедших в расплав. Момент времени 19000 с

▶ Работа над кодом будет продолжена в 2023 году. Запланирована его доработка по результатам использования в АО «НИКИЭТ» для моделирования референтного сценария запроектной аварии, а также составление матрицы верификации и валидации кода для стадии тяжёлого повреждения активной зоны.

3. Разработка, верификация и аттестация расчётного кода для описания процессов в бассейне выдержки при тяжёлом повреждении топлива и выполнение расчётных исследований с его использованием (работы выполнены по заказу АО «ВНИИАЭС», генеральный заказчик — АО «Концерн Росэнергоатом»)

Разработана, валидирована и аттестована в 2022 году программа для ЭВМ SFPSim/V2.0, предназначенная для расчётного анализа последствий аварий с потерей охлаждения или охлаждающей жидкости в бассейнах выдержки (БВ) АЭС с РУ ВВЭР, в том числе и при тяжёлом повреждении топлива (рис. 2.1.11).



Рис. 2.1.11 — Аттестационный паспорт программы SFPSim/V2.0

С помощью программы решается согласованная задача поведения различных конструкций в БВ (тепловыделяющих сборок (ТВС), пеналов и т.п.). Рассматриваются ТВС/ОТВС, содержащие твэлы с UO_2 топливом и оболочками из сплава Э110, помещенные в СУХТ.

Программа состоит из пяти модулей: канального теплогидравлического модуля (HYDRA-IBRAE/H2O) с включенным в его состав аэрозольным модулем (AERCONT), твэльного модуля (SFPR/C++), модуля для описания процессов разрушения элементов бассейна выдержки (HEFEST_CORE) и модуля для определения остаточного энерговыделения (NEUTRON_3D), которые объединяются в общий код с помощью программной оболочки.

С использованием программы для ЭВМ могут быть определены следующие расчётные параметры: температура оболочек твэл; температура теплоносителя; уровень воды; расход в течь; критическое паросодержание; масса сгенерированного водорода; границы теплогидравлической устойчивости в системе параллельных каналов; остаточное тепловыделение; изменение массы твэла из-за поглощенного кислорода при окислении в паре и воздухе; толщина слоя оксида циркония на внешней поверхности оболочки твэла; время до разрыва оболочки твэла; температура разрыва оболочки твэла; относительный выход продуктов деления из топлива под оболочку твэла; активности химических элементов, накопленные в топливе на начало аварийного процесса; температура расплава конструкций бассейна выдержки; скорости выхода компонентов топлива и продуктов деления из расплава конструкций бассейна выдержки; пиковый поток тепла во внешнее охлаждение стеллажей бассейна выдержки; распределение линейной плотности UO_2 по высоте твэла при плавлении; концентрация компонентов (H_2O_2 , H_2 (в растворе и над поверхностью), O_2) при радиолизе воды с примесями пероксида водорода, водорода и кислорода; эффективность осаждения продуктов деления на поверхностях.

Программа для ЭВМ создана путем доработки / адаптации модулей, входящих в состав программно-технического комплекса «Виртуально-цифровая АЭС с ВВЭР».

4. Разработка и развитие расчётных программ для задач обоснования безопасности ОНЯТ в области базовых термоядерных технологий (работы выполнены по государственному заданию, государственный заказчик — Министерство науки и высшего образования РФ)

В 2022 году основной акцент был сделан на разработке кода миграции трития в технологических системах **ОНЯТ TRITIUM-F**, в частности:

- выполнены идентификация и ранжирование процессов и явлений, определяющих поведение трития в технологических системах ОНЯТ;
- определен перечень явлений, модели которых в первую очередь необходимо учитывать в расчётном коде поведения трития, а именно: проницаемость изотопов водорода через стенки конструкционных материалов, накопление изотопов водорода в объеме конструкционных материалов, наработка трития, окисление молекулярного трития НТ до тритиевой воды НТО при взаимодействии с кислородом в материале оксидных пленок и оксидами металлов, растворенных в объеме жидкометаллического теплоносителя, дегазация трития из жидкометаллического и жидкосолевого теплоносителя в газовый объем с последующим переносом трития по газовому контуру;
- выполнен анализ имеющихся экспериментальных данных, которые могут использоваться для валидации кода;
- разработана матрица верификации и валидации моделей в расчётном коде, в которую по результатам анализа более двухсот публикаций вошло **16 экспериментов**, выполненных на установках в России (7 экспериментов), Казахстане (5 экспериментов) и других странах (4 эксперимента);
- подготовлен перечень дополнительных экспериментальных данных, которые необходимо получить для валидации кода **TRITIUM-F**;

- выполнена доработка моделей базового расчётного кода для основных механизмов поведения трития в технологических системах ОНЯТ. В качестве базового кода для доработки принят модуль TRITIUM интегрального кода Евклид/V2, разработанный в рамках проекта «Коды нового поколения» проектного направления «Прорыв»;
- проведена программная доработка базового модуля на случай автономной работы кода TRITIUM-F, обеспечивающая возможность моделировать наработку, перенос, дегазацию и проницаемость трития через металлические стенки трубопроводов. В частности, в код добавлены модели наработки трития в PbLi теплоносителе и проницаемости трития через металлические слои для различных вариантов сред по сторонам слоя, кроме того, база данных по коэффициентам диффузии изотопов водорода дополнена данными для конструкционных материалов, типичных для технологических систем ОНЯТ;
- выполнена проверка правильности программной реализации моделей на основе сравнения результатов численного решения с точными аналитическими решениями для тестовых задач. Относительная погрешность расчёта для массы водорода составила менее 0,1% для всех моделей;
- подготовлена инструкция пользователя разработанной автономной версии кода для моделирования поведения трития в технологических системах TRITIUM-F, включающая подробные описания процедуры запуска кода, подготовки входного файла и его основных атрибутов, а также примеры тестовых задач и соответствующих входных файлов.

В качестве примера на рис. 2.1.12 и рис. 2.1.13 приведены схема аналитического теста и результаты верификации модели проницаемости трития через стенку двух соосных труб. В начальный момент времени во внутренней трубе находится гелий с примесью трития. Во внешней трубе находится свинцово-литиевая эвтектика. В результате проникновения трития через металлическую стенку соосных труб происходит переход части трития из газового теплоносителя внутренней трубы в расплав эвтектики во внешней трубе. Результаты сравнения показаны на рис. 2.1.13.

► В 2023 году планируется валидация моделей кода TRITIUM-F на основе матрицы верификации и валидации, разработанной в 2022 году.

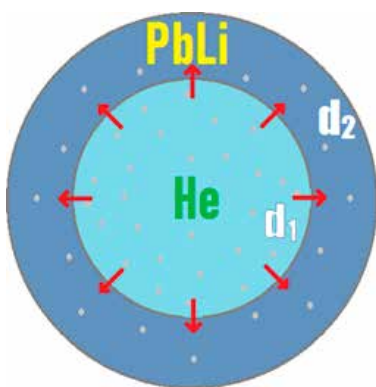


Рис. 2.1.12 – Поперечное сечение моделируемой области для теста по проницаемости трития через стенку соосных труб

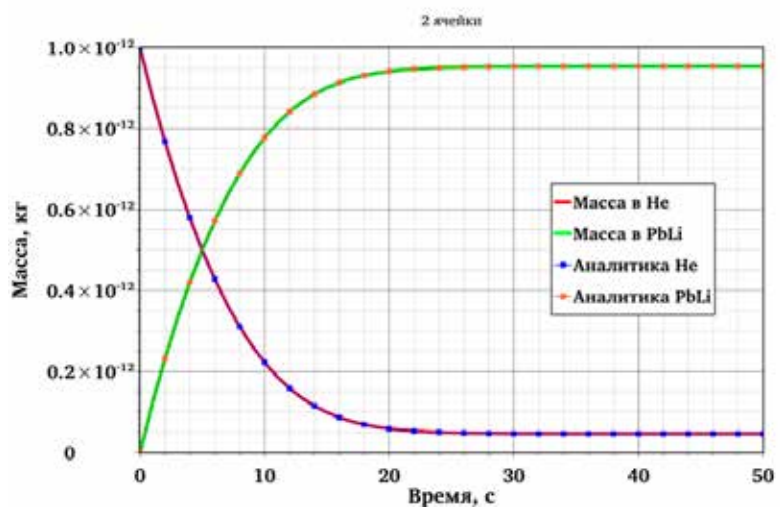


Рис. 2.1.13 – Сравнение расчётных результатов модуля TRITIUM-F с аналитическим решением

5. Расчётный анализ и контроль напряженно-деформированного состояния защитных оболочек АЭС с РУ ВВЭР-1000 (работы выполнены по заказу филиала АО «Концерн Росэнергоатом» Ростовская АЭС, а также в рамках плана НИР ИБРАЭ РАН)

По заказу филиала АО «Концерн Росэнергоатом» «Ростовская атомная станция» выполнена работа на тему: «Оценка НДС и уровня обжатия защитной оболочки энергоблока № 4 Ростовской АЭС по результатам контроля системы СПЗО-М и показаниям КИА АСК НДС и СКУ». На основе анализа результатов контроля усилий в армоканатах защитной оболочки реакторного отделения № 4 Ростовской АЭС сделан вывод о том, что за рассматриваемый период эксплуатации и технического обслуживания система преднапряжения работала в соответствии с проектом.

Расчётная оценка НДС защитной оболочки энергоблока № 4 Ростовской АЭС, выполненная после испытания на герметичность, показала, что уровень преднапряжения достаточен для восприятия защитной оболочкой всех предусмотренных проектом нагрузок и воздействий, что дает основания ожидать надежную работу арматурных пучков СПЗО-М до следующего планово-предупредительного ремонта в 2027 году.

По заказу филиала АО «Концерн Росэнергоатом» «Ростовская атомная станция» ведутся работы на тему: «Разработка альтернативного метода контроля напряженно-деформированного состояния (НДС) защитных оболочек энергоблоков №№ 1, 2 Ростовской АЭС на основе измерения геометрических параметров сооружения геодезическими методами с разработкой и аттестацией методики измерений».

На этапе 2022 года разработана и согласована с АО «Атомэнергопроект» методика контроля напряженно-деформированного состояния защитной оболочки АЭС на основе измерения геометрических параметров сооружения геодезическими методами и результатов расчёта.

Разработана методика построения геодезической диагностической системы для определения геометрических параметров защитных оболочек энергоблоков № 1 и № 2 Ростовской АЭС в период эксплуатации и испытаний на герметичность. Технология создания геодезического обоснования, восстанавливаемого в любой период существования защитной оболочки, предусматривает использование основных строительных конструкций реакторного отделения в качестве исходных элементов.

Также в рамках плана НИР ИБРАЭ РАН выполнена научно-исследовательская работа по теме: «Анализ динамического воздействия на защитную оболочку реакторного отделения АЭС обрыва напряженного арматурного каната». В расчётах учтены эксплуатационные нагрузки со стороны арматурных канатов системы преднапряжения, собственный вес сооружения, температурное воздействие, динамические нагрузки, обусловленные обрывом одного арматурного каната.

Анализ результатов расчётов позволил сделать вывод о том, что все сечения защитной оболочки АЭС при прогнозируемых уровнях натяжения арматурных канатов СПЗО и учёте эксплуатационных факторов и динамического воздействия от обрыва каната остаются сжимающими и обеспечивают прочность и работоспособность защитной оболочки (рис. 2.1.14). Динамическое воздействие от обрыва каната, имеющего наибольшую длину, проходящего через все характерные зоны ЗО и имеющего максимально возможную силу натяжения в соответствии с проектными требованиями приводит к незначительным перемещениям стенки, которые в зонах максимальной податливости не превышают 1,6 мм. Приращение растягивающих напряжений в бетоне стенки ЗО вследствие обрыва каната не превышает 2 МПа.

► В 2023 году будут продолжены работы по апробации метода оценки напряженно-деформированного состояния защитной оболочки АЭС на основе измерения геометрических параметров сооружения геодезическими методами и результатов расчёта на действующих энергоблоках № 1 и № 2 Ростовской АЭС, планируется аттестация методики измерений.

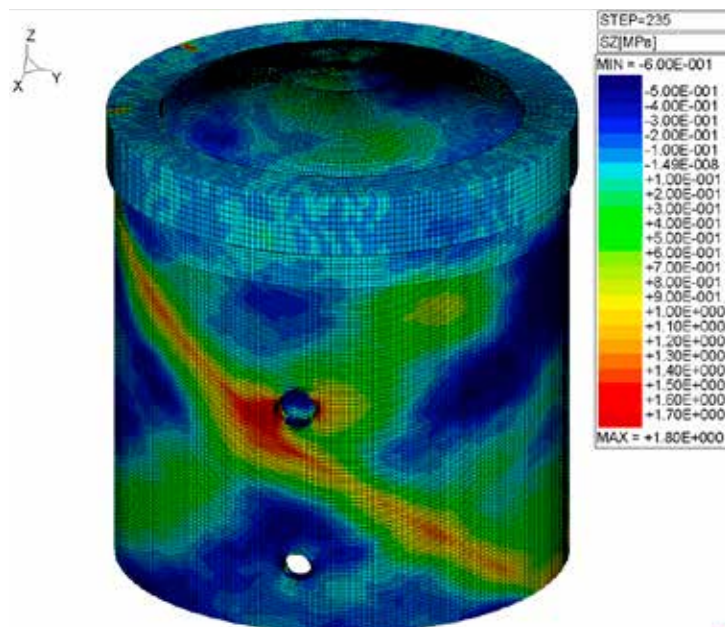


Рис. 2.1.14 – Распределения меридиональных напряжений в теле 30 при воздействии динамических усилий от обрыва одного каната (вид со стороны проходок)

6. 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)

Классические прикладные математические модели основаны на системах дифференциальных уравнений. Нестационарные процессы описываются параболическими и гиперболическими уравнениями. Более общие модели, которые частично наследуют свойства параболических и гиперболических уравнений, связаны с эволюционными интегро-дифференциальными уравнениями. Простейшие нелокальные по времени задачи порождаются дробными производными по времени, приближенные методы для которых активно обсуждаются в последнее десятилетие.

Численное исследование многомерных краевых задач для уравнений с памятью проводится с помощью стандартных конечно-элементных или конечно-объемных аппроксимаций по пространству. Основное внимание уделяется построению аппроксимаций по времени. Для интегро-дифференциальных уравнений первого порядка наиболее простой подход связан с использованием тех или иных квадратур для интегрального члена и обычных двухслойных аппроксимаций производной по времени: неявная схема Эйлера и схема Кранка-Николсона. Такие аппроксимации не очень удобны для применения. Решение зависит от полной истории и поэтому при переходе на новый слой по времени необходимо работать с решением на всех предыдущих слоях во времени. Наиболее интересные возможности предоставляют методы, основанные на аппроксимации ядра, что приводит нас к более простым задачам.

Выполнен цикл исследований по проблемам численного решения задачи Коши для эволюционных уравнений первого и второго порядка с памятью, когда ядро интегрального члена является разностным. Рассматриваемая нелокальная задача преобразуется в локальную, при этом решается слабо связанная система уравнений с дополнительными обыкновенными дифференциальными уравнениями. Предложенный подход основан на аппроксимации разностного ядра суммой экспонент. Получены оценки устойчивости решения относительно начальных данных и правой части для соответствующей задачи Коши. Построены и исследованы безусловно устойчивые двух- и трехслойные схемы с весами, которые удобны для вычислительной реализации. Теоретические результаты дополнены данными численных экспериментов для модельных двумерных задач.

► Полученные результаты будут использованы в 2023 году для построения вычислительных алгоритмов приближенного решения ряда прикладных проблем. Основное внимание будет уделено задачам теплопроводности с учётом эффектов памяти и нелокальным моделям вязкоупругого твердого тела.

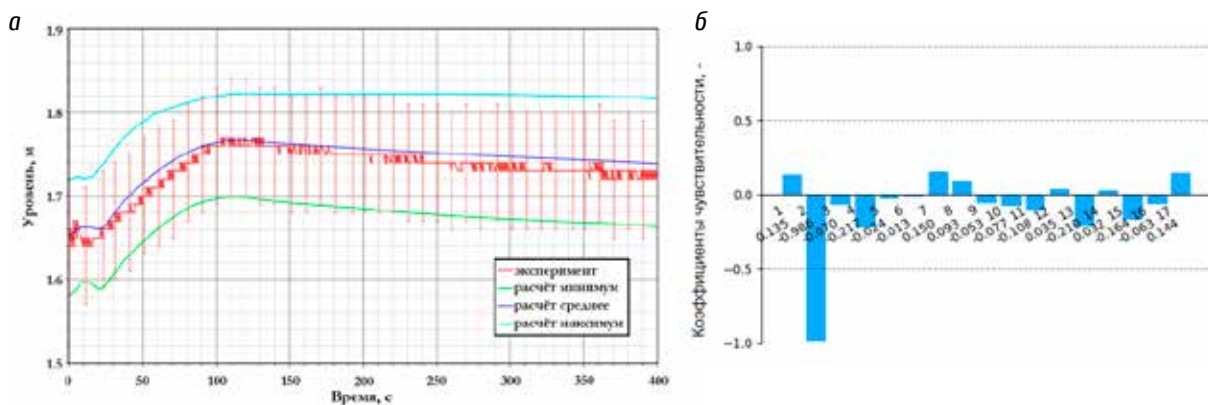
7. Доработка методики оценки погрешностей и неопределенностей результатов расчётов процессов, влияющих на безопасность объектов использования атомной энергии (работы выполнены в рамках плана НИР ИБРАЭ РАН)

В 2022 году продолжена работа над «Методикой оценки погрешностей и неопределенностей расчётных результатов, получаемых по программам для ЭВМ, используемым в целях построения расчётных моделей процессов, влияющих на безопасность объектов использования атомной энергии и (или) видов деятельности в области использования атомной энергии». При доработке учитывался опыт проведения верификации и валидации программ для ЭВМ, ключевые положения результатов анализа обосновывающих материалов по программам для ЭВМ, сформулированные во время заседаний тематических секций экспертного совета по аттестации программ для ЭВМ при Ростехнадзоре, а также вопросы и предложения специалистов ИБРАЭ РАН.

Были определены критерии объединения результатов экспериментов для совместной статистической обработки в соответствии с требованиями РБ-166-20. Доработана процедура выбора интервалов неопределенности для погрешностей расчётных величин, и зафиксировано их представление в проекте аттестационного паспорта программы для ЭВМ.

Методика использовалась при верификации и валидации программ **TITAN-1/V1.0**, **TITAN-2/V1.0**, **HYDRA-IBRAE/LM** и других. Результат применения методики для валидации программы TITAN-1/V1.0 на примере расчёта уровня воды в парогенераторе в эксперименте ГТ-2х25-02 на установке ПСБ-ВВЭР показан на рис. 2.1.15.

► В 2023 году планируется доработка методики для обеспечения консерватизма расчётов проектных аварий по кодам улучшенной оценки. Совместно со специалистами ФБУ «НТЦ ЯРБ» планируется определить пути развития рекомендаций по анализу неопределенностей и их учёту при обосновании безопасности объектов использования атомной энергии.



1 – мощность РУ, 2 – уровень в ПГ-1, 3 – уровень в ПГ-2, 4 – уровень в ПГ-3, 5 – уровень в ПГ-4, 6 – уровень в ГЕ СА03-1, 7 – уровень в ГЕ СА03-2, 8 – уровень в ГЕ СА03-3, 9 – уровень в ГЕ СА03-4, 10 – мощность на БУ, 11 – давление в 1 контуре, 12 – уровень в КД, 13 – расход в петле-1, 14 – расход в петле-2, 15 – расход в петле-3, 16 – расход в петле-4, 17 – давление во 2-м контуре (паровом коллекторе)

Рис. 2.1.15 – Расчёт уровня воды в парогенераторе в эксперименте ГТ-2х25-02 на установке ПСБ-ВВЭР: сравнение расчётного диапазона неопределенности уровня воды с экспериментальными измерениями (а) и коэффициенты чувствительности к варьированию исходных данных (б):

Полученные специалистами Отделения результаты научно-исследовательских работ были представлены на ведущих российских и международных конференциях, на которых получили высокую оценку научного сообщества, в частности, на Международной конференции «[International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles FR22: Sustainable Clean Energy for the Future](#)», прошедшей с 18 по 22 апреля 2022 года, основное место проведения конференции — г. Вена (Австрия). Участие представительной делегации российских экспертов было организовано из делового центра АО «ОКБМ Африкантов». Специалистами ИБРАЭ РАН были представлены доклады по кодам нового поколения проектного направления «Прорыв», в частности, обзорный доклад д.т.н. Н. А. Мосуновой «Коды нового поколения — основа для расчётного моделирования объектов проектного направления «Прорыв», доклад инженера-исследователя А. В. Задорожного «Механистический код БЕРКУТ-У: самосогласованное моделирование термомеханического состояния и процессов, протекающих в твэле быстрых реакторов», сообщение к.ф.-м.н. А. В. Палагина «Развитие моделей системного теплогидравлического кода HYDRA-IBRAE/LM для моделирования РУ на быстрых нейтронах».

На молодежной научно-практической конференции АО «ВНИИНМ» «Материалы и технологии в атомной энергетике» А. В. Задорожный представил результаты моделирования поведения твэла-прототипа быстрого реактора БРЕСТ-ОД-300 с жидкометаллическим (свинцовым) подслоем.

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. Alipchenkov V.M., Grudtsyn Ya.V., Ilyasova O.H., Mosunova N.A. Simulation of the processes occurring during steam generator tube rupture in the lead cooled reactor unit using HYDRA-IBRAE/LM code // Progress in Nuclear Energy, 2022. 149. 104278. 6 p.
3. Vabishchevich Petr N. Numerical solution of the Cauchy problem for Volterra integrodifferential equations with difference kernels // Applied Numerical Mathematics, 2022. Vol.174. P. 177–190.
4. Vabishchevich P.N. Numerical solution of the heat conduction problem with memory // Computers & Mathematics with Applications, 2022. Vol. 118, P. 230–236.
5. Тарасов О.В., Назаров Д.А., Синицын Д.С., Мосунова Н.А., Сорокин А.А. Описание моделей горения натрия в помещениях АЭС с РУ БН интегрального кода ЕВКЛИД/V2 и результаты их валидации // Теплоэнергетика, 2022. — № 7. — С. 38–49.
6. Озрин В.Д., Филиппов А.С. Новая модель разложения бетона и плавления его остаточных компонентов при взаимодействии с расплавом в шахте водо-водяного реактора при тяжёлой аварии // Теплофизика высоких температур, 2022. — Т. 60. № 6. — С. 905–915.
7. Чуданов В.В., Аксенова А.Е., Первичко В.А. Расчёт параметров свободно-конвективного течения свинцово-висмутевого сплава в полости с поперечным градиентом температуры с помощью кода CONV-3D // Атомная энергия, 2022. — Т. 132. №4. — С. 240–242.
8. Колташев Д.А., Мосунова Н.А., Стрижов В.Ф., Бутов А.А., Климонов И.А., Чухно В.И., Усов Э.В. Особенности расчёта нейтронно-физических процессов в активной зоне быстрого реактора с натриевым теплоносителем на этапе ее разрушения // Атомная энергия, 2022. — Т. 132. № 4. — С. 204–210.
9. Чуданов В.В., Аксенова А.Е., Первичко В.А. Валидация модуля на базе LES- и DNS-приближений для моделирования однофазного течения жидкометаллического теплоносителя в круглых трубах // Атомная энергия, 2022. — Т. 132. №5. — С. 303–305.
10. Белов А.А., Березнев В.П., Блохина Г.С., Вепрев Д.П., Колташев Д.А., Потапов В.С., Чертовских О.И., Шершов А.В. Расчётное моделирование кампании реактора со свинцовым теплоносителем с использованием кода ЕВКЛИД/VI // Известия высших учебных заведений, Ядерная энергетика. 2022. — № 2. — С. 138–147.



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.
(kstv@ibrae.ac.ru)

КЛЮЧЕВЫЕ СПЕЦИАЛИСТЫ

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

А. В. Капустин — разработка, валидация и апробирование физико-математических моделей поведения расплава на поздней стадии тяжёлой аварии на АЭС с ВВЭР, расчётная поддержка задач локализации и охлаждения расплава (kapustin@ibrae.ac.ru);

Н. И. Рыжов — разработка и практическое применение методик анализа неопределённости и чувствительности в задачах валидации программ для ЭВМ и численного моделирования тяжёлых аварий на АЭС (rni@ibrae.ac.ru);

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

Д. Ю. Томащик — численное моделирование тяжёлых запроектных аварий на АЭС с ВВЭР, создание и программная реализация физико-математических моделей для различных элементов активной зоны, первого контура, систем безопасности и защитной оболочки АЭС в аварийных условиях (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 2022 ГОДА

1. Успешно завершена экспертиза Отчёта о верификации Программы для ЭВМ (ПрЭВМ) **СОКРАТ-В1/В2** в Ростехнадзоре, что позволяет использовать всю линейку версий ПрЭВМ СОКРАТ в проектных работах по обоснованию безопасности АЭС с ВВЭР как в России, так и за рубежом, включая задачи лицензирования эксплуатируемых и строящихся энергоблоков АЭС, разработки и верификации руководств по управлению тяжёлыми авариями, детерминистической поддержки вероятного анализа безопасности.
2. С использованием ПрЭВМ СОКРАТ выполнены детерминистические расчётные исследования тяжёлых аварий в поддержку вероятностного анализа безопасности второго уровня для энергоблоков АЭС с ВВЭР-ТОИ и ВВЭР-1000. Также совместно с ТКЦ ИБРАЭ РАН впервые выполнен комплекс расчётных работ по анализу эффективности мер по управлению тяжёлыми авариями с точки зрения формирования радиоактивного выброса и соответствующих радиационных последствий для населения на примере энергоблока АЭС с ВВЭР-1000.
3. В рамках внедрения в практику использования ранее разработанного методического подхода для учёта погрешностей и неопределённостей расчётов при анализе запроектных аварий на АС с РУ ВВЭР выполнены демонстрационные работы по анализу неопределённости источников парогазовой и пароводяной смеси в объёме под защитной оболочкой ВВЭР-1000 и системы локализации аварий на ВВЭР-440. Полученные результаты позволяют распространить неопределённости источника горючих газов на задачи реалистической оценки эффективности системы удаления водорода при помощи CFD моделей.
4. Впервые была выполнена адаптация и демонстрация применения методик для учёта погрешностей и неопределённостей расчётов проектных и запроектных аварий на АЭС с РУ БН. Для анализа запроектных аварий использовался опыт разработки и применения

методики для АЭС с РУ ВВЭР. На основе данного подхода выполнен анализ аварии для типового блока быстрого реактора с натриевым теплоносителем, в результате которого получены реалистичные значения ключевых параметров, важных для безопасности при аварии с полным обесточиванием и отказом на срабатывание аварийной защиты. Для анализа проектной аварии была выполнена модификация подхода, представленного в руководстве по безопасности РБ-166-20, в части демонстрации консервативного подхода, требуемого при анализе проектных аварий. На основе адаптированной методики были проведены демонстрационные расчёты с полной мгновенной блокировкой проходного сечения в одной ТВС. Результаты расчёта с учётом консервативных предположений подтвердили выполнение приёмочного критерия для данной аварии.

5. В рамках подготовки к выполнению работ по расчётно-аналитическому обоснованию системы удержания расплава и охлаждения корпуса реактора (СУРОК) сформулированы требования и пути совершенствования феноменологических моделей ПрЭВМ СОКРАТ применительно к задаче внутрикорпусного удержания расплава.

6. В рамках научно-технической поддержки ГК «Росатом» был выполнен анализ возможности начала радиоактивного выброса вследствие потери электроснабжения в хранилище отработавшего ядерного топлива на площадке Чернобыльской АЭС. В рамках оперативной поддержки Госкорпорации «Росатом» были предложены технические меры по предотвращению повреждения ядерного топлива и показано наличие большого запаса времени для принятия таких мер. Также совместно с ТКЦ были выполнены оперативные оценки запасённой радиоактивности в ядерном топливе с целью определения радиационных последствий в результате внешних воздействий на Запорожскую АЭС в западной части Российской Федерации и на территориях сопредельных стран.

7. 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.

8. В рамках разработки и подготовки к валидации программы для расчётного анализа тяжёлых аварий для атомных станций малой мощности (АСММ) выполнен анализ программ испытаний элементов ТВС и модельных ТВС и выработаны рекомендации к ним, способствующие получению новых экспериментальных данных в объёме и качестве, достаточных для разработки и валидации физико-математических моделей, описывающих динамику деградации активной зоны АСММ на внутрикорпусной стадии ТА. В рамках анализа для проекта АСММ впервые определен перечень ключевых процессов и явлений и сформирован общий вид матрицы верификации и валидации будущей ПрЭВМ (рис. 2.1.16).



Е. А. Долженков, н.с., занял третье место в конкурсе молодых ученых, проводившемся в рамках научно-практической конференции «Нейтронно физические проблемы атомной энергетики (Нейтроника-2022)» 31 мая – 03 июня 2022 года, Обнинск (Калужская обл.)

Задачи и сроки создания ПрЭВМ для анализа безопасности АСММ с РУ РИТМ-200 при ТА

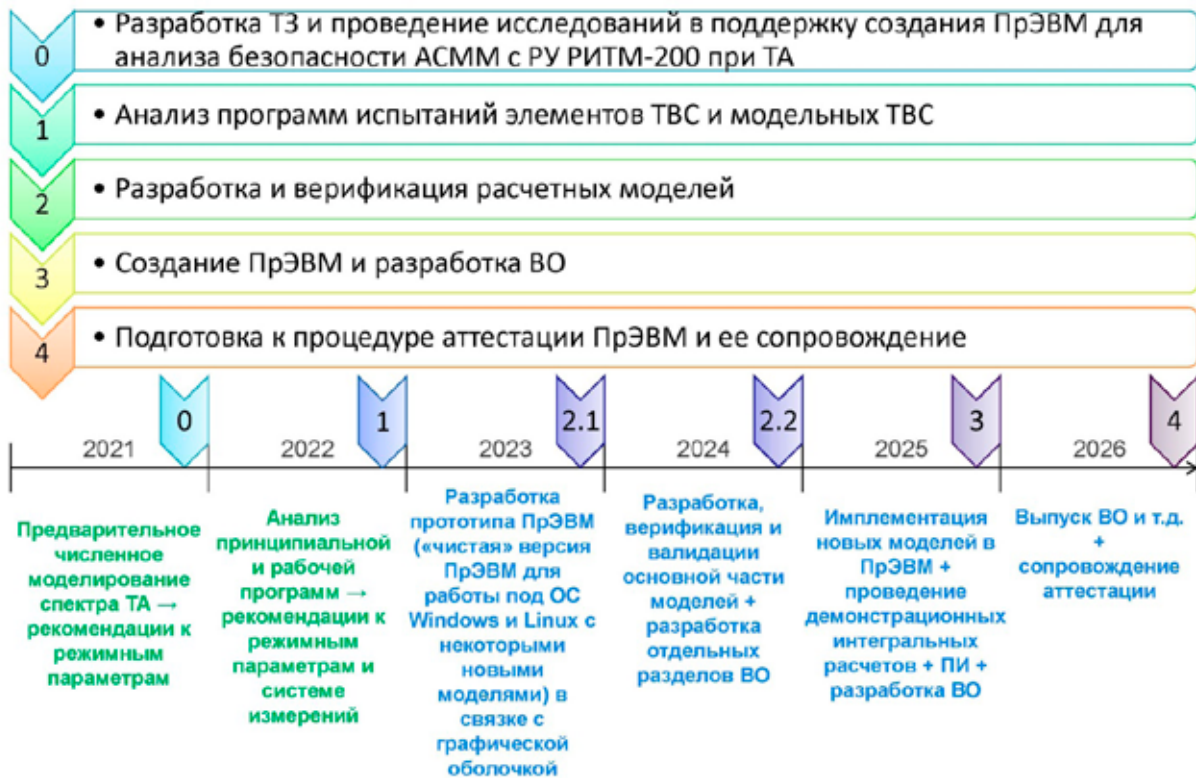


Рис. 2.1.16 – Этапы создания ПрЭВМ для анализа безопасности АСММ при тяжёлых авариях

Кроме того, выполнены пре-тестовые расчётно-аналитические оценки динамики деградации штатной и модельной ТВС АСММ при тяжёлой аварии.

9. Совместно с ЦНТП ИБРАЭ РАН был выполнен **четвертый этап работ по НИОКР** «Создание системы сквозного моделирования развития аварийных процессов и параметров радиационной обстановки в СЗЗ и ЗН АЭС в случае тяжёлых запроектных аварий на АЭС с выходом радиоактивных веществ в атмосферу». В рамках выполнения этапа было проведено тестирование функций модуля расчёта источника выброса внутренним и внешним тестировщиком, подготовлены матрицы верификации и валидации, проведены валидационные расчёты и кросс-верификация с ПрЭВМ СОКРАТ на результатах аварийных расчётов. Кроме того, в рамках выполнения технических требований к модулю расчёта источника выброса проведена разработка входных наборов для различных эксплуатационных состояний и исходных событий аварий.

10. В рамках выполнения **4-го этапа НИР** «Создание новых поколений вычислительных алгоритмов, моделей и программных средств для инновационных ядерных и термоядерных энерготехнологий и ядерного топливного цикла» проведен анализ представленных в открытых публикациях экспериментальных данных и результатов расчётных исследований химических взаимодействий йода и цезия в газовой фазе первого контура, в атмосфере защитной оболочки и в приемке АЭС в ходе тяжёлых аварий. В результате анализа был сформирован перечень химических реакций с соединениями цезия и йода, протекающих в газовой среде первого контура и защитной оболочки, учёт которых наиболее важен с точки зрения оценки результирующего радиоактивного выброса из-под защитной оболочки в окружающую среду, а также перечень экспериментов для разработки соответствующих моделей химического взаимодействия и их верификации. Полученные результаты могут быть использованы при разработке математических моделей интегральных кодов и их матриц верификации.

11. Выполнен комплекс работ в рамках международных проектов:

- в рамках проекта АЯЭ **ОЭСР ARC-F** подготовлены и направлены для включения в сводный отчёт итоговые материалы, разработанные по результатам численного исследования отдельных задач безопасности применительно к аварии на энергоблоке 1 АЭС «Фукусима Дайичи»;
- в рамках координационного исследовательского проекта **МАГАТЭ CRP I31033**, посвященного совершенствованию практического применения методологий неопределённости и чувствительности для анализа тяжёлых аварий на водоохлаждаемых реакторах, в 2022 году сотрудниками ИБРАЭ был подготовлен раздел планируемого TECDOC и направлен в МАГАТЭ для рецензирования. Результаты были представлены на четвертом координационном совещании, которое прошло онлайн с 7 по 10 ноября 2022.
- в рамках международного координационного проекта **МАГАТЭ ATF-TS** выполнено численное моделирование интегральных экспериментов **QUENCH-19** (KIT, Германия), **DEGREE** (CRIEPI, Япония) по разогреву и охлаждению пучков имитаторов твэлов с оболочками из циркониевых сплавов и из аварийно-устойчивого сплава FeCrAl. Показана необходимость дальнейших работ по учёту в моделях тяжелоаварийных ПрЭВМ специфических процессов и явлений, имевших место в ходе экспериментов и непосредственно влиявших на температурный режим и образование водорода.

КЛЮЧЕВЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАБОТ

1. Vladimir N. Blinkov, Oleg I. Melikhov, Vladimir I. Melikhov, Andrey V. Kapustin, Kirill S. Dolganov, Dmitry Yu. Tomashchik, Vladimir N. Semenov, Artem E. Tarasov, Sergey S. Selkin / Investigation on the interphase drag and wall friction in vertically oriented upward and downward two-phase flows under accident conditions in light water reactors, Nuclear Engineering and Design, 389 (2022) 111666, <https://doi.org/10.1016/j.nuceng-des.2022.111666>.
2. Долженков Е.А., Томащик Д.Ю., Рыжов Н.И. Модель нуклидной кинетики для расчёта тяжёлых аварий / Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы, Вып. 4, 2022.
3. Васильев А.Д., Долганов К.С., Киселёв А.Е., Матвеев Л.В., Семёнов В.Н. Инженерная модель окисления слоя бериллиевой пыли в условиях аварии с истечением теплоносителя из системы охлаждения в вакуумную камеру ИТЭР / ВАНТ Серия: Термоядерный синтез, Т. 45, Вып. 2, 2022.
4. Долженков Е.А. Валидация модели окисления карбида бора в паровой среде / Сборник трудов XXI научной школы молодых ученых ИБРАЭ РАН, 2022, — С. 40–43, <https://elibrary.ru/item.asp?id=48428879>.
5. Гембицкий Н.Д., Долганов К.С. Исследование возможности уменьшения радиоактивного выброса через БРУ-А при тяжёлой аварии на АЭС с ВВЭР / Сборник трудов XXI научной школы молодых ученых ИБРАЭ РАН, 2022, — С. 32–35, <https://elibrary.ru/item.asp?id=48428919&pf=1>.



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 2022 ГОДА

1. Совместно со специалистами ИТ СО РАН выполнены экспериментальные исследования, направленные на установление закономерностей двухфазных течений, состоящих из свинцового теплоносителя, находящегося при температуре 450°C (газовая фаза — аргон) и свинцово-висмутового теплоносителя, находящегося при температуре 160°C (газовая фаза — аргон). Теплофизические свойства свинцового и свинцово-висмутового теплоносителей, такие как плотность, теплоёмкость и коэффициент поверхностного натяжения, отличаются друг от друга на единицы процентов для выбранных условий проведения экспериментов.

В ходе исследований проводились фиксация формы газовых пузырей, поднимающихся в неподвижном расплаве металла в зависимости от расхода газа, измерение размеров пузырьков газа, газосодержания. Эволюция пузырей в расплаве свинца сравнивалась с соответствующей эволюцией пузырей газа в свинцово-висмутовом теплоносителе. Динамика пузырьков газа в жидкости классифицировались по трем безразмерным параметрам: числу Рейнольдса, числу Этвеша, числу Мортонна.

При минимальном расходе газа в жидком свинце появляются маленькие пузырьки газа, минимальный размер пузырька, который удается стабильно получать, находится в диапазоне около 3 мм. На рис. 2.1.17 на примере пузырька газа, всплывающего в жидком свинце в трубе диаметром 30 мм приведено сравнение с формой аналогичного пузырька в свинцово-висмутовом расплаве. Так же, как и для свинцово-висмутового расплава, при постепенном увеличении расхода газа нестабильность формы пузырьков возрастает, пузырек не только изменяет форму при своем движении, но и меняет траекторию движения. При увеличении расхода газа в свинцовом теплоносителе появляются пузыри большего размера в виде эллипса (рис. 2.1.18).

В результате измерений установлена одинаковая зависимость изменения осредненного газосодержания от расхода дисперсной фазы в случаях использования в качестве рабочих жидкостей как жидкого свинца, так и свинцово-висмутового расплава. Различие в данных не превышает 10%, что сравнимо с неопределённостью измерений. Увеличение газосодержания свыше 10%, вызываемое соответствующим увеличением расхода газа, приводит в обоих случаях к переходу на снарядный режим течения.

На основе анализа критериев подобия (чисел Рейнольдса, Этвеша и Мортонна) установлено, что **двухфазное течение в свинцовом теплоносителе подобно аналогичному течению в свинцово-висмутовом теплоносителе**, что позволяет достоверно моделировать эволюцию газовых пузырей и структуру течения в жидком свинце, используя модель свинцово-висмутового теплоносителя. Соответственно результаты по динамике пузырьков газа,

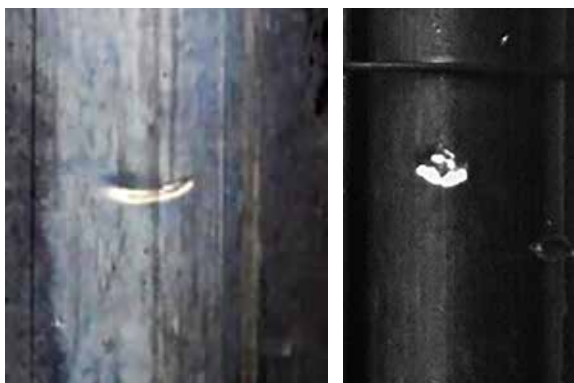


Рис. 2.1.17 – Сравнение формы газового пузыря в жидком свинце (слева), $Eo = 6,6$, $T = 450^\circ\text{C}$, и свинцово-висмутовом расплаве (справа), $Eo = 9,7$, $T = 160^\circ\text{C}$



Рис. 2.1.18 – Сравнение формы газового пузыря в жидком свинце (слева), $Eo = 28$, $T = 450^\circ\text{C}$, и свинцово-висмутовом расплаве (справа), $Eo = 34,1$, $T = 160^\circ\text{C}$

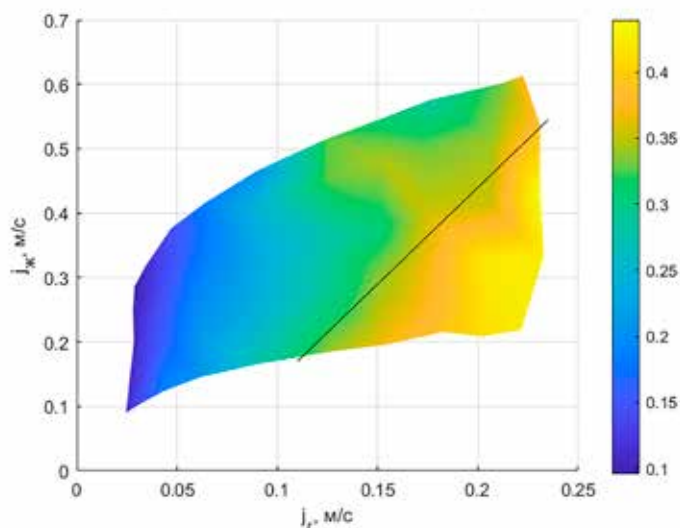


Рис. 2.1.19 – Карта режимов двухфазного течения свинцово-висмутового теплоносителя с нейтральным газом

получаемые для двухфазной системы, состоящей из свинцово-висмутового теплоносителя и газовой фазы, можно переносить на систему, состоящую из свинцового теплоносителя и газовой фазы.

2. Выполнены исследования параметров восходящего двухфазного течения, состоящего из тяжёлого жидкометаллического теплоносителя (свинец-висмут) и инертного газа, в каналах различного диаметра с варьированием расходов газа и ТЖМТ. В экспериментах помимо изменения расхода фаз изменялся и диаметр канала — от 10 мм до 30 мм. На основе более чем 90 режимов течения получен массив данных по структуре двухфазного течения, гистограммам распределения скорости газовой фазы, размеру пузырей газа в зависимости от расходов фаз, диаметра канала, объёмного газосодержания. Полученные данные позволили не только скорректировать известные подходы к определению границ режимов восходящего двухфазного течения, но и обосновать карту режимов двухфазного течения ТЖМТ с газом.

В качестве примера на рис. 2.1.19 приведена карта режимов двухфазного течения в трубе диаметром 20 мм, построенная по приведённым скоростям жидкости и газа. Цветом обозначено газосодержание. Как видно из рисунка, существуют совершенно определенные области, в которых реализуются либо пузырьки (синяя область), либо газовые снаряды (желтая область). Граница, которая разделяет пузырьковый и снарядный режимы течения, нанесена в виде сплошной линии. Например, при газосодержании равном 10%, реализуется пузырьковый режим течения со средним размером пузырей порядка 5÷10 мм. При газосодержании больше 25% средняя (включая мелкие пузырьки в жидких пробках) длина пузырей составляет около двух калибров трубы — реализуется снарядный режим течения. При газосодержаниях, превышающих 45%, снарядный режим становится сильно неустойчивым. Газовые снаряды начинают объединяться в большие полости, между которыми возможно существование жидких перемычек, несколько снарядов могут двигаться в виде большой агломерации, при этом газ концентрируется в центре канала. Наблюдается сильно асимметричное поведение потока. Можно констатировать, что при газосодержании более 50% реализуется хаотический «пенный» режим течения, который при дальнейшем увеличении газосодержания переходит в структуру двухфазного течения с концентрацией газовой фазы по оси канала.

Полученные данные по скоростям движения фаз позволяют построить график зависимости скорости дисперсной фазы от относительных скоростей газа и жидкости. Это позволило уточнить модель потока дрейфа двухфазного течения для её использования в случае жидкометаллического теплоносителя.

3. Совместно со специалистами ИТ СО РАН проведено экспериментальное исследование естественной циркуляции на замкнутом гидродинамическом контуре в режимах течения теплоносителя, близких по основным критериям подобия течению ТЖМТ в реальной РУ.

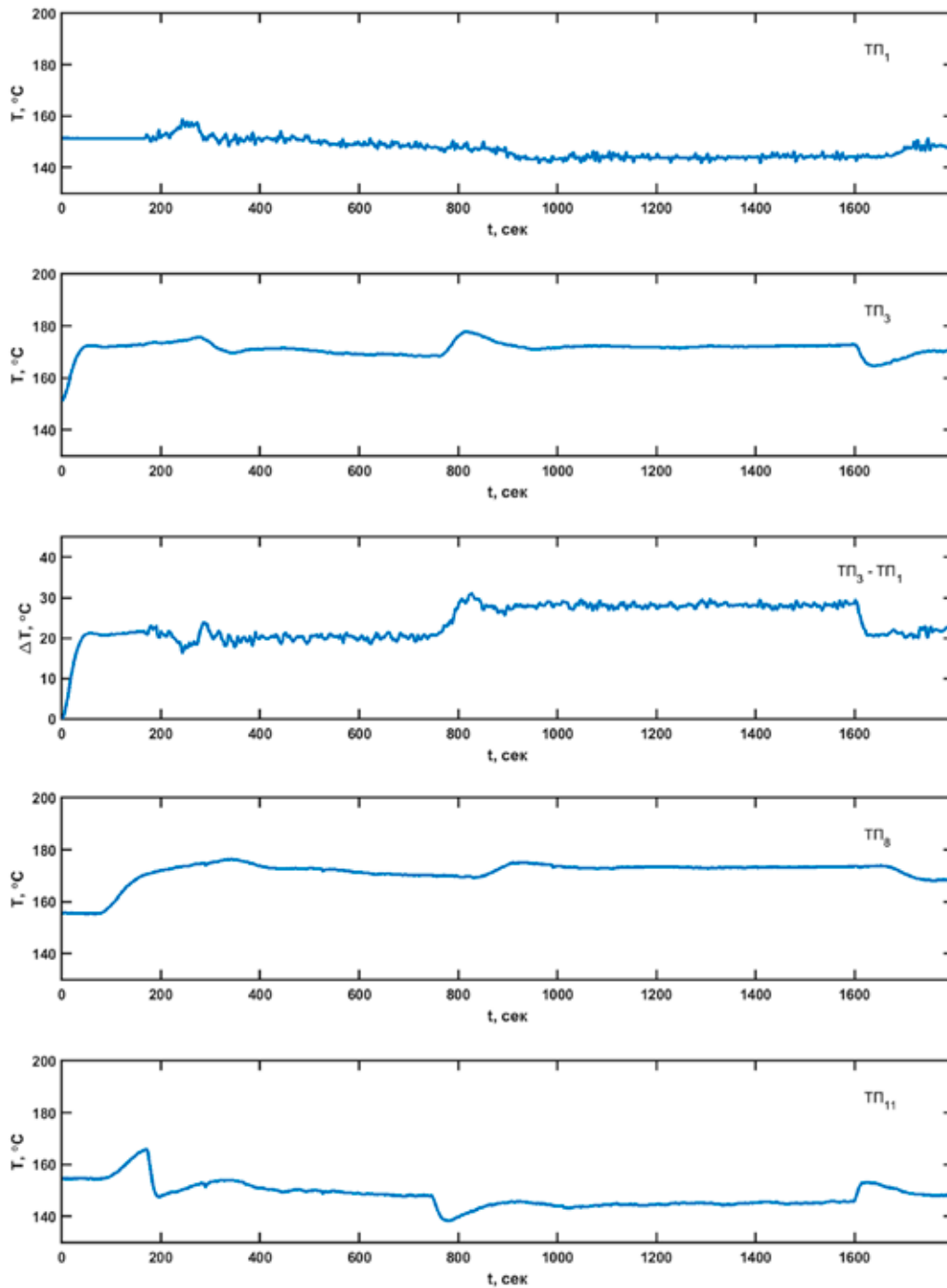


Рис. 2.1.20 – Пример изменения температуры теплоносителя на входе в имитатор ТВС, выходе из него, на входе в теплообменник и выходе из него, и соответствующее изменение температурного напора

Реализован режим естественной циркуляции ТЖМТ (свинцово-висмутовый сплав) при его прогреве за счёт энерговыделения в модельной ТВС и стока избыточного тепла в теплообменном устройстве. Модельная ТВС представляла собой семитвэльную конструкцию с длиной области энерговыделения 0,46 м, внешним диаметром имитаторов твэлов 0,01 м, относительным шагом 1,4 м и гидравлическим диаметром 0,0108 м. Подводящие трубопроводы имели внутренний диаметр 0,035 мм. Расстояние между центрами областей энерговыделения и стока тепла — 2,9 м.

Получены: оцененные данные по развитию естественной циркуляции теплоносителя с нулевой мощности тепловыделения, переходу от режима вынужденной циркуляции теплоносителя в контуре установки к естественной, интенсивности естественной циркуляции в

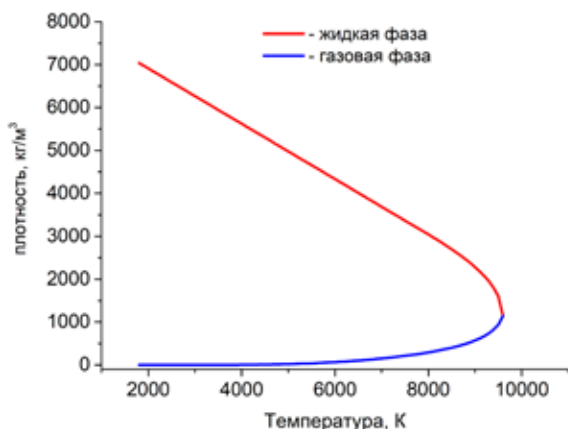


Рис. 2.1.21 — Плотность стали в жидком и газообразном состояниях

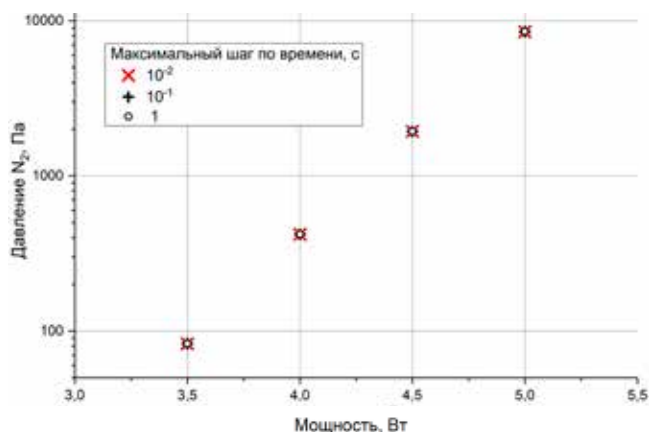


Рис. 2.1.22 — Результаты расчёта с различным максимальным временным шагом

зависимости от величины тепловыделения в контуре; детальные данные измерений температуры теплоносителя на входе и выходе имитатора ТВС, в теплообменнике и каналах контура. На рис. 2.1.20 приведены типичные зависимости изменения температур теплоносителя в различных участках циркуляционного контура.

Данные измерений сведены в таблицу, где для каждого теста указаны начальное тепловыделение, температуры на входе и выходе ТВС, температурный напор в циркуляционной петле, расход теплоносителя, плотность и вязкость теплоносителя, числа Рейнольдса и Ричардсона для течения в ТВС, трубопроводе и теплообменнике.

4. Проведена доработка тяжелоаварийного модуля **SAFR** интегрального кода **ЕВКЛИД/V2** в части учёта кипения конструкционных материалов и топлива, учёта подавления диссоциации за счёт добавления азота в газовую атмосферу над нитридом.

В частности, выполнен анализ данных по расчёту свойств стали в жидком и газообразном состояниях. Результаты расчёта по методике приведены на рис. 2.1.21.

5. Проведена доработка моделей диссоциации нитридного топлива в части учёта возможности подавления диссоциации. Пример расчёта давления, подавляющего диссоциацию, приведён на рис. 2.1.22.

КЛЮЧЕВЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАБОТ

1. В.И. Чухно, Д.А. Назаров, А.А. Сорокин, Т.В. Сычева, Э.В. Усов, Н.А. Мосунова. Результаты верификации и валидации модуля OXID интегрального кода ЕВКЛИД/V2 в части физико-химических моделей процессов в свинцовом теплоносителе // Теплоэнергетика. 2022. — № 6. — С. 1–8.
2. M.P. Krivov, G.A. Kireev, A.V. Tenishev, A.V. Davydov, M.V. Skupov, I.D. Solomatina, N.A. Mosunova, E.V. Usov, V.I. Chukhno. Thermogravimetric study of mixed uranium-plutonium fuel for prospective generation IV reactors // 2022. Journal of Nuclear Materials. Vol. 567 153798.
3. Э.В. Усов, В.И. Чухно, И.А. Климонов, А.А. Бутов, Н.А. Мосунова, В.Ф. Стрижов. Моделирование термического взаимодействия топлива и натриевого теплоносителя с использованием интегрального кода ЕВКЛИД/V2 // Теплоэнергетика, 2022, No 11, с. 28–34
4. Д.А. Колташев, Н.А. Мосунова, В.Ф. Стрижов, А.А. Бутов, И.А. Климонов, В.И. Чухно, Э.В. Усов. Особенности расчета нейтронно-физических процессов в активной зоне быстрого реактора с натриевым теплоносителем на этапе ее разрушения // Атомная энергия. 2022. — Т. 134. № 4. — С. 204–210.



ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ УПРАВЛЕНИЯ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ



Заведующий отделом

С. В. Сумароков

(sumarokov@ibrae.ac.ru)

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

ОСНОВНОЙ СПЕЦИАЛИЗАЦИЕЙ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ОТДЕЛА ЯВЛЯЮТСЯ ТЕХНОЛОГИИ УПРАВЛЕНИЯ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ (PLM – PRODUCT LIFECYCLE MANAGEMENT), ВКЛЮЧАЯ ТЕХНОЛОГИИ ПРОВЕДЕНИЯ ВИРТУАЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ. В ОТДЕЛЕ АКТИВНО ВЕДУТСЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ПРИМЕНЕНИЮ РАЗЛИЧНЫХ ПРОГРАММНЫХ ПРОДУКТОВ И ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ ВИРТУАЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ



ОСНОВНЫЕ ИТОГИ 2022 ГОДА

1. Система «УРАНИЯ»

В рамках ПН «Прорыв» продолжается разработка системы управления данными и процессами расчётных и экспериментальных научных исследований «УРАНИЯ». Система «УРАНИЯ» предназначена для автоматизации управления расчётными и экспериментальными данными, а также организации совместной работы всех участников процессов проведения расчётных и экспериментальных исследований (рис. 2.1.23).

«УРАНИЯ» создаётся в ИБРАЭ РАН при поддержке ведущих разработчиков РУ на быстрых нейтронах — АО «ОКБМ Африкантов» и АО «НИКИЭТ». В качестве платформы для «УРАНИИ» выступает система **CML-Bench**, разработанная Санкт-Петербургским политехническим университетом Петра Великого. В 2022 году успешно завершены испытания релиза 2.0 «УРАНИИ». Релиз 2.0 позволяет автоматизировать проведение расчётных исследований, включая управление расчётными данными и бизнес-процессами расчётных обоснований, а также содержит функционал пре/постпроцессинга и визуализации результатов расчётов. Также в 2022 году был разработан релиз 3.0 «УРАНИИ», в котором реализованы интеграционные модули к PLM-системам, применяемым разработчиками РУ на быстрых нейтронах, и расширены возможности по пре/постпроцессингу с использованием удалённых вычислительных ресурсов.

▶ В 2023 году будет продолжено развитие функционала «УРАНИИ», а также планируется ввод системы в постоянную эксплуатацию у первого пользователя — интегрирующей структуры АО «Прорыв».

2. Расчётные комплексы для решения оптимизационных задач и параметрических исследований

В рамках ПН «Прорыв» в 2022 году была продолжена разработка расчётных комплексов для решения оптимизационных задач и выполнения параметрических исследований (РКО). Разрабатываемые РКО построены на базе специализированной программной платформы и подключаемых к ней через соответствующие программные интерфейсы расчётных кодов и пре/постпроцессоров. Расчётные комплексы позволяют исследователю автоматизировать поиск оптимальных решений в соответствии с заданной постановкой.

Разработанный ранее **расчётный комплекс для решения оптимизационных задач теплогидравлики (РКО ТГ)** успешно прошёл приёмочные испытания, в 2023 году планируется его внедрение в АО «НИКИЭТ» как в рамках ПН «Прорыв», так и по другим тематикам.

Была разработана полнофункциональная версия **расчётного комплекса для решения задач оптимизации режимов эксплуатации РУ (РКО РЭ)**, предназначенная для проведения автоматизированных вариантных исследований, направленных на поиск оптимальных режимов работы оборудования РУ в номинальном и в переходных состояниях. Также совместно с ОАО «НПО «ЦКТИ» проведены её предварительные испытания на базе «Расчетной модели турбоустановки и систем II контура энергоблока с РУ БРЕСТ-ОД-300». Была успешно решена модельная задача снижения перепада давления на регулирующем клапане питательного гидротурбинного насоса. В результате проведенного исследования достигнуто снижение перепада давления с 3,5 МПа до 0,8 МПа, при этом были соблюдены условия устойчивости и высокого качества регулирования.

По итогам проведённых в 2022 году предварительных испытаний была доработана **полнофункциональная версия расчётного комплекса для решения задач оптимизации нагрузок на трубопроводные системы (РКО ТС)**, предназначенного для оптимизации опорно-подвесной системы трубопроводов АЭС посредством многовариантных расчётов на

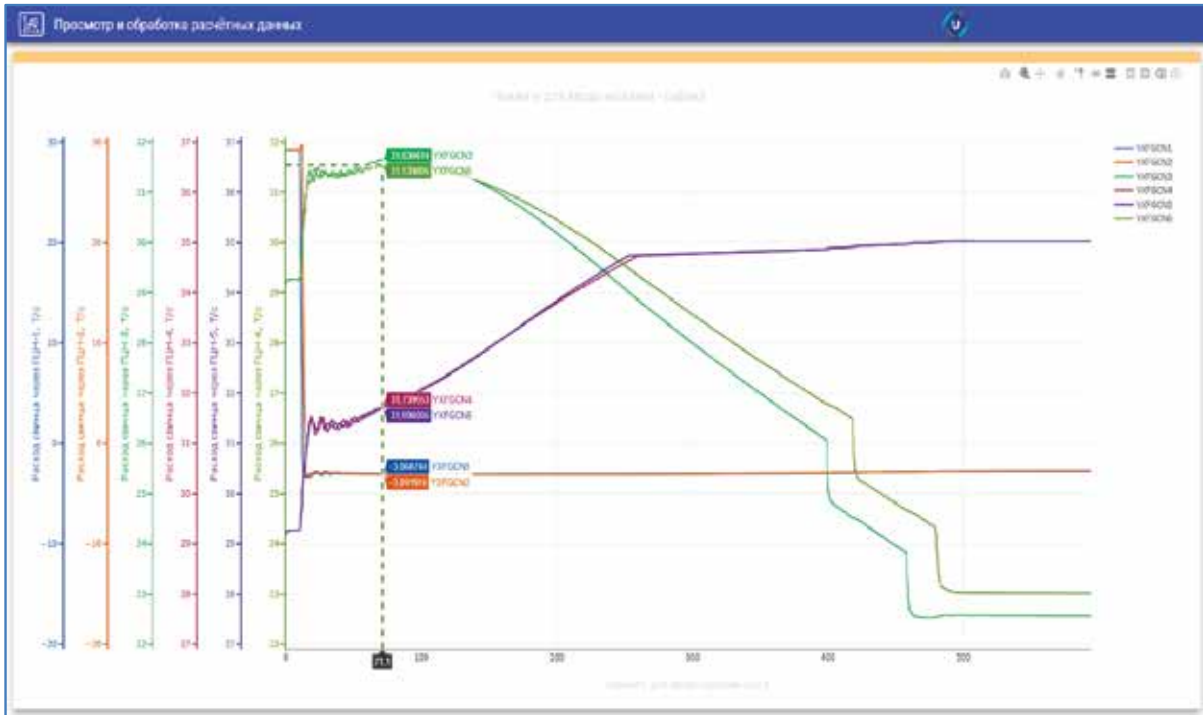


Рис. 2.1.23 – Визуализация результатов расчёта интегральной расчётной математической модели РУ БР-1200 при помощи системы «УРАНИЯ»

Расчёт целевых функций

- Учитывать прочность опор, заданных из каталога
- Учитывать прочность пружинных опор и подвесок
- Учитывать прочность динамических амортизаторов
- Учитывать прочность патрубков арматуры для статки
- Учитывать прочность патрубков арматуры для сеймики

Исходная модель

Выбор файла модели: TEST_000_01.dos

Область ОПТИМИЗАЦИИ: Выбран оптимальный участок: 17/84, Выбраны узлы: 87/482, Выбрано опор: 6/21

Область оптимизации задана в файле и не может быть изменена

| Именование | Тип | Исходное значение |
|---|-----------------|--------------------------|
| Валюс прочности | Целевая функция | 0.03 |
| Условие прочности трубопровода | Ограничение | не удовлетворяет (3.09) |
| Условие прочности опор и патрубков арматуры | Ограничение | не удовлетворяет (18.48) |
| Положение опор: 15800_3 | Параметр | 0 |

| Имя | Состояние | Время отклика, с |
|-----|-----------|------------------|
| 75 | Активен | 14:27 19.04.2022 |
| 89 | Активен | 14:01 19.04.2022 |
| 88 | Активен | 14:02 19.04.2022 |
| 87 | Активен | 13:40 19.04.2022 |
| 26 | Активен | 16:29 19.04.2022 |
| 18 | Активен | 15:59 19.04.2022 |
| 84 | Активен | 15:01 19.04.2022 |
| 83 | Активен | 14:24 19.04.2022 |
| 82 | Активен | 12:14 19.04.2022 |
| 80 | Активен | 12:06 19.04.2022 |

Рис. 2.1.24 – Примеры экранных форм интерфейса РКО ТС

прочность трубопроводов АЭС при действии эксплуатационных и сейсмических нагрузок, выполняемых в ПК dPIPE 5 (рис. 2.1.24). В новом релизе улучшены возможности по постановке оптимизационной задачи, а также ряд сервисных функций. В настоящее время РКО ТС проходит тестирование в АО «Атомэнергопроект».

Разработана полнофункциональная версия **расчётного комплекса для решения задач оптимизации конструкции оборудования на основе его прочностных характеристик (РКО ПК)**, предназначенного для проведения параметрических исследований и решения оптимизационных задач с использованием методов параметрической оптимизации и расчётов на прочность конструкции технологического оборудования, выполняемых расчётными кодами «Зенит-95» и Ansys Mechanical. РКО ПК предоставляет возможности варьирования материала и исходной геометрии модели, а также автоматической проверки прочностных характеристик исследуемого объекта на соответствие нормам.

Разработана **полнофункциональная версия расчётного комплекса для решения оптимизационных нейтронно-физических задач (РКО НФ)**, предназначенного для проведения параметрических исследований и решения оптимизационных нейтронно-физических задач с использованием методов параметрической оптимизации при проведении расчётов активных зон быстрых реакторов с жидкометаллическими теплоносителями. РКО НФ во взаимодействии с расчётным кодом ЕВКЛИД/V1 позволяет варьировать модели компоновки а. з. реактора, геометрические и материальные параметры ТВС, контролировать и/или оптимизировать интегральные характеристики а. з. (например, избыточную реактивность, компенсируемую с помощью ТВС с ПКР, массу стартовой загрузки топлива и т. п.) и исследовать полученные конфигурации а. з.

► В 2023 году запланированы приёмочные испытания РКО РЭ, РКО ТС, РКО ПК и РКО НФ, а также подготовительные работы по их внедрению на предприятиях-пользователях.

3. Цифровая информационная модель активной зоны РБН проектного направления «Прорыв»

В 2022 году была проведена доработка цифровой информационной модели (ЦИМ) активной зоны РБН проектного направления «Прорыв». ЦИМ применяется в отделе науки АО «Прорыв» для цифровизации, объективизации, анализа и визуализации разнородной информации об активной зоне РБН ПН «Прорыв» (структуры объектов, параметров и характеристик, требований, результатов расчётных обоснований, применяемых расчётных кодов) в части обеспечения выполнения требований к эксплуатационным характеристикам, норм ядерной и радиационной безопасности.

В настоящий момент ЦИМ обладает следующими **функциональными возможностями:**

- ведение справочника характеристик активной зоны РБН, а также агрегированных показателей, вычисляемых по формулам, для оценки на их основе выполнения требований по обеспечению ядерной безопасности;
- автоматизированная передача результатов расчётов из применяемых в ПН «Прорыв» программного комплекса РТМ-2 и расчётного кода ЕВКЛИД/V1 в цифровую информационную модель;
- проверка корректности использования программного средства, соответствия аттестованной области применения, подтверждения аттестацией перечня расчётных характеристик;
- сравнение результатов расчётов с требованиями, предъявляемыми к характеристикам активной зоны РБН ПН «Прорыв» (рис. 2.1.25), в табличном виде и на 3D-модели с цветовой индикацией степени выполнения требований и отображением влияния на них отдельных расчётных параметров;

- формирование проектов стандартизированных документов по нейтронно-физическому и теплогидравлическому расчётам активной зоны.

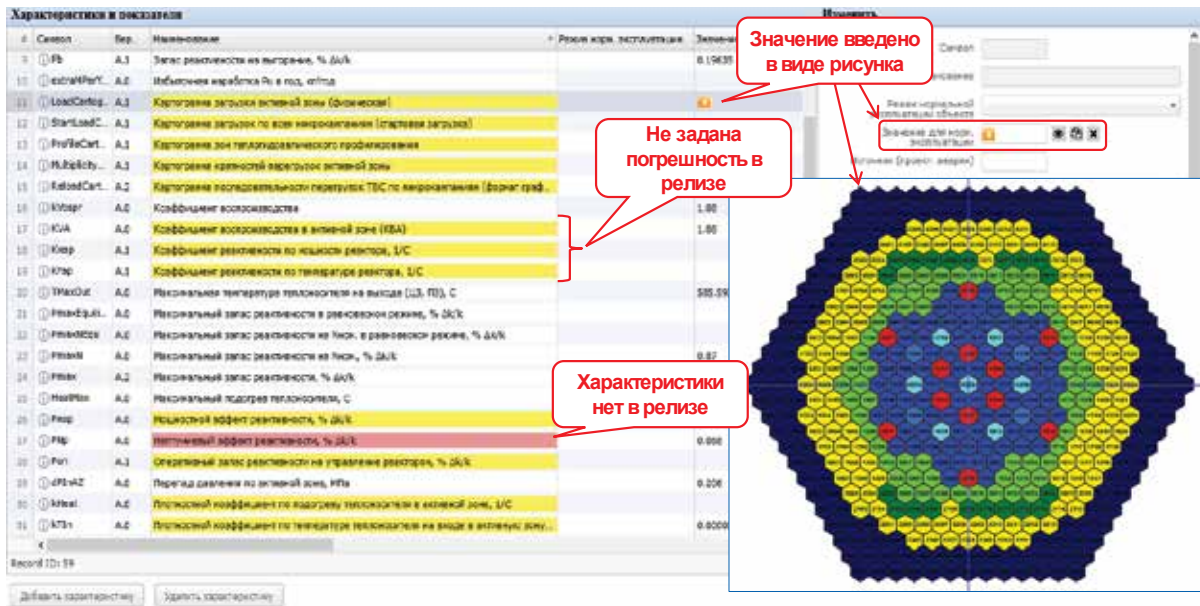


Рис. 2.1.25 – Пример экранной формы интерфейса ЦИМ

- В 2023 году будет продолжено развитие функционала ЦИМ, а также импортозамещение применяемой программной платформы.

КЛЮЧЕВЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАБОТ

1. С.В. Сумароков, А.А. Кечков, Т.А. Грошев, С.О. Кириенко. Автоматизация сохранения и обработки результатов расчетов интегральной расчетной математической модели в системе «УРАНИЯ» // Информационные технологии в проектировании и производстве, 2022. – №2 (186), – С. 41–46.

2.2. БЕЗОПАСНОСТЬ ЗАВЕРШАЮЩИХ СТАДИЙ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ОБЪЕКТОВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ И НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

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 вопросы обращения 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)

Заведующий отделом — **А. А. Самойлов**, к.т.н. (samoylov@ibrae.ac.ru);

КЛЮЧЕВЫЕ СПЕЦИАЛИСТЫ

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

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

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

Д. Ф. Ильясов, к.э.н — цифровизация и экономика вывода из эксплуатации ОИА (idf@ibrae.ac.ru);

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

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

Е. Г. Мамчиц — сопровождение подготовки отчетности по Объединенной конвенции (egor@ibrae.ac.ru);

О. О. Епифанова (ooo@ibrae.ac.ru), **Алексей А. Федьков** (alexfed@ibrae.ac.ru) — создание IT-инфраструктуры;

В. Б. Уткин (utkin.vb@ibrae.ac.ru), **Ин. И. Линге** (iil@ibrae.ac.ru) — создание комплексной методологии цифровизации в сфере ВЭ и обращения с РАО;

В. И. Шпиньков — развитие нормативной базы в области безопасности термоядерных и гибридных систем (shvi@ibrae.ac.ru);

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

Ключевые молодые специалисты: Овчинников И.Д., Степанян П.О., Александрова Т.А., Сергунин А.П.

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

- 1 СОЗДАНИЕ ЦИФРОВЫХ ИНСТРУМЕНТОВ ДЛЯ ЗАДАЧ КОМПЛЕКСНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ 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

ОСНОВНЫЕ ИТОГИ 2022 ГОДА

1. Создание цифровых инструментов для задач комплексного планирования и оптимизации ВЭ и обращения с РАО.

Продолжены работы по внедрению современных цифровых информационных технологий в практику планирования и проектирования работ по ВЭ, расширена география рассматриваемых объектов: от крупных комплексов промышленных реакторов до отдельных площадок по переработке и хранению РАО. Разработаны цифровые информационные модели (ЦИМ) объектов и площадок для АО «ОДЦ УГР» (г. Северск, Томская обл.), объектов площадки для производства твэл и хвостохранилища ПАО «НЗХК» (г. Новосибирск), Приволжского филиала ФГУП «РАДОН» (г. Кирово-Чепецк, Кировская обл.) (рис. 2.2.1) и площадки НПК ФГУП «РАДОН» (г. Сергиев Посад, Московская обл.) (рис. 2.2.2).

Построение моделей с использованием наземного лазерного сканирования, проектной и исполнительной документации и данных отчетов инженерного и радиационного обследования обеспечивает эксплуатирующую и проектную организацию полным объемом данных об основных архитектурных, технологических, инженерных решениях, о радиационном и химическом загрязнении элементов конструкций и оборудования. Использование современных средств цифровизации и информатизации позволяет подняться на более качественный уровень понимания текущего состояния объектов, проведения предварительных оценок стоимости будущих работ по ВЭ, разработки рекомендаций по применению технических решений и обращению со всеми видами отходов.

Совместно с сотрудниками смежных отделов разработан комплекс расчётных моделей для обоснования безопасности конечного состояния рассматриваемых площадок и работ по ВЭ, учитывающих возможные пути дозового воздействия на персонал и население (геомиграционная модель, модель дозового воздействия при водопользовании, модель атмосферного переноса РВ). На рисунке 2.2.3 представлен фрагмент геомиграционной модели площадки Приволжского филиала ФГУП «РАДОН».

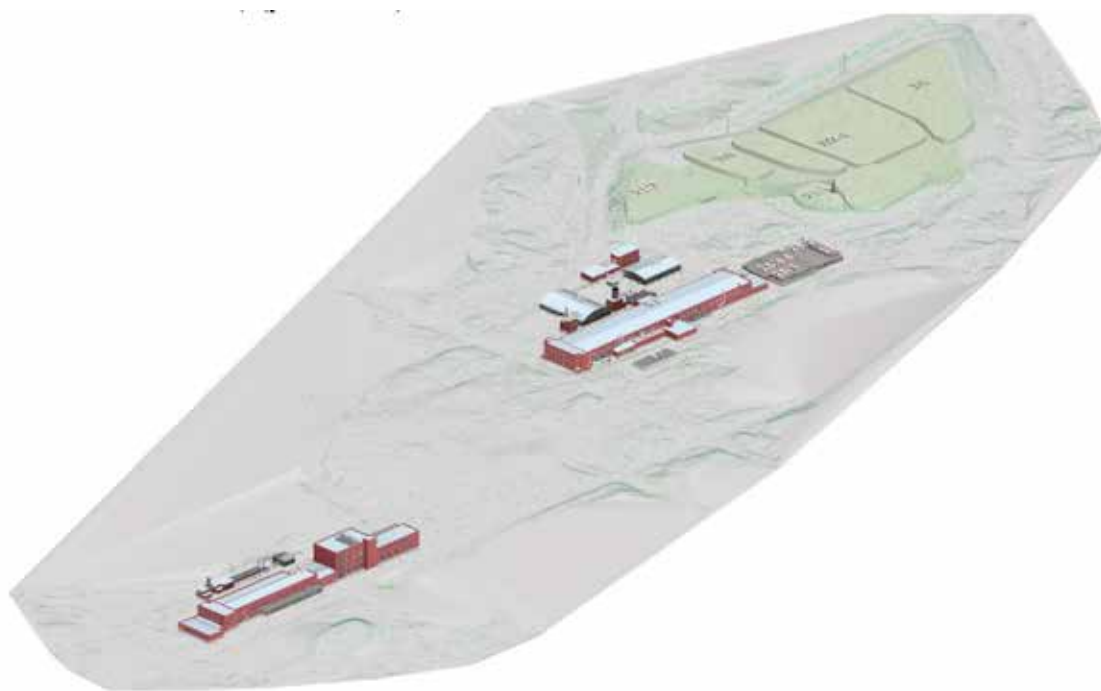


Рис. 2.2.1 – ЦИМ площадки Приволжского филиала ФГУП «РАДОН»

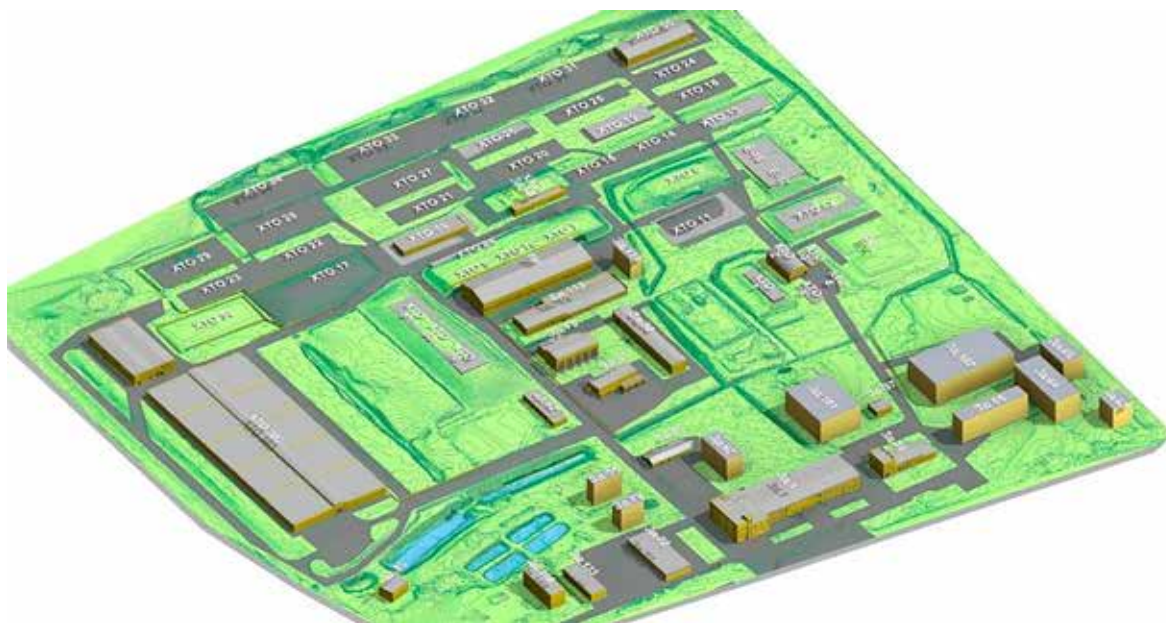


Рис. 2.2.2 – ЦИМ площадки НПК ФГУП «РАДОН»

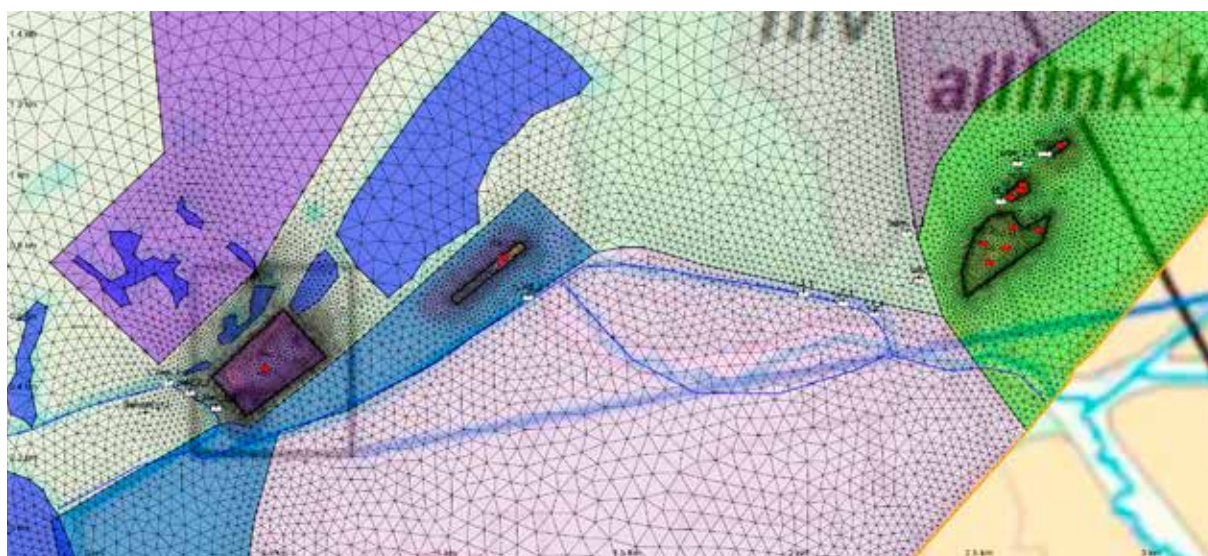


Рис. 2.2.3 – Фрагмент геомиграционной модели с расположением источников для площадки Приволжского филиала ФГУП «РАДОН»

Проведенные на их основе оценки подтвердили возможность обеспечения долговременной безопасности ключевых объектов площадки Приволжского филиала ФГУП «РАДОН», а также продемонстрировали возможность безопасного проведения работ по ВЭ отдельных объектов АО «ОДЦ УГР». В будущем эти разработки должны стать основой для создания базы данных по ВЭ, планирования и проектирования работ.

Для площадки НПК ФГУП «РАДОН» (г. Сергиев Посад, Московская обл.) на основе сведений о технологических процессах обращения с РАО, мониторинга, подготовки к ВЭ созданы ЦИМ объектов площадки и разработана концепция «цифрового двойника» промышленной площадки. На основе сопоставления данных наземного лазерного ска-

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ
СОВРЕМЕННЫХ СРЕДСТВ
ЦИФРОВИЗАЦИИ И
ИНФОРМАТИЗАЦИИ
ПОЗВОЛЯЕТ
ПОДНЯТЬСЯ НА БОЛЕЕ
КАЧЕСТВЕННЫЙ
УРОВЕНЬ ПОНИМАНИЯ
ТЕКУЩЕГО СОСТОЯНИЯ
ОБЪЕКТОВ**

нирования площадки в 2019 г. и 2022 г. сделаны предварительные оценки перспективности применения метода лазерного сканирования для мониторинга и идентификации деформаций инженерных барьеров безопасности пунктов хранения РАО.

В составе концепции «цифрового двойника» площадки НПК ФГУП «РАДОН» описана базовая архитектура системы цифрового двойника на основе датчиков промышленного интернета вещей и сети связи (LoRaWAN), интеграции с АСУиК РВ и РАО, информационными системами предприятия (цифровой архив), базой данных по подлежащим выводу из эксплуатации объектам, системами мониторинга и контроля радиационной обстановки.

В дальнейшем на основании выполненных работ планируется обеспечить разработку технического проекта наиболее актуальных систем и элементов «цифрового двойника» площадки НПК ФГУП «РАДОН» для последующей реализации в рамках технологического переоснащения предприятия. Основные принципиальные подходы и технические решения, после их апробации на пилотной площадке, могут быть тиражированы и на другие предприятия отрасли.

Для эффективного обеспечения задач финансово-экономического планирования проектов ВЭ в ИБРАЭ РАН разработана первая версия программного обеспечения «**Decommissioning Smart Manager**» (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2023610167), использующего в качестве исходных данных информацию из разрабатываемых ЦИМ о строительных конструкциях и загрязнении различных поверхностей и оборудования ЯРОО (рис. 2.2.4).

Существующие в настоящее время в России автоматизированные решения по управлению проектами и выполнению сметных расчетов ориентированы, в первую очередь, на демонтаж объектов, не имеющих радиационных загрязнений и разнообразной номенклатуры отходов, т. е. не применимы для вывода из эксплуатации ЯРОО. На текущий момент «Decommissioning Smart Manager» позволяет решать следующие задачи:

- проводить оценку стоимости работ, а также подробный технико- и финансово-экономический анализ для заданного плана (последовательности технологических операций) ВЭ ЯРОО;
- разрабатывать экономическое обоснование при выборе оптимального варианта конечного состояния площадки или объекта;

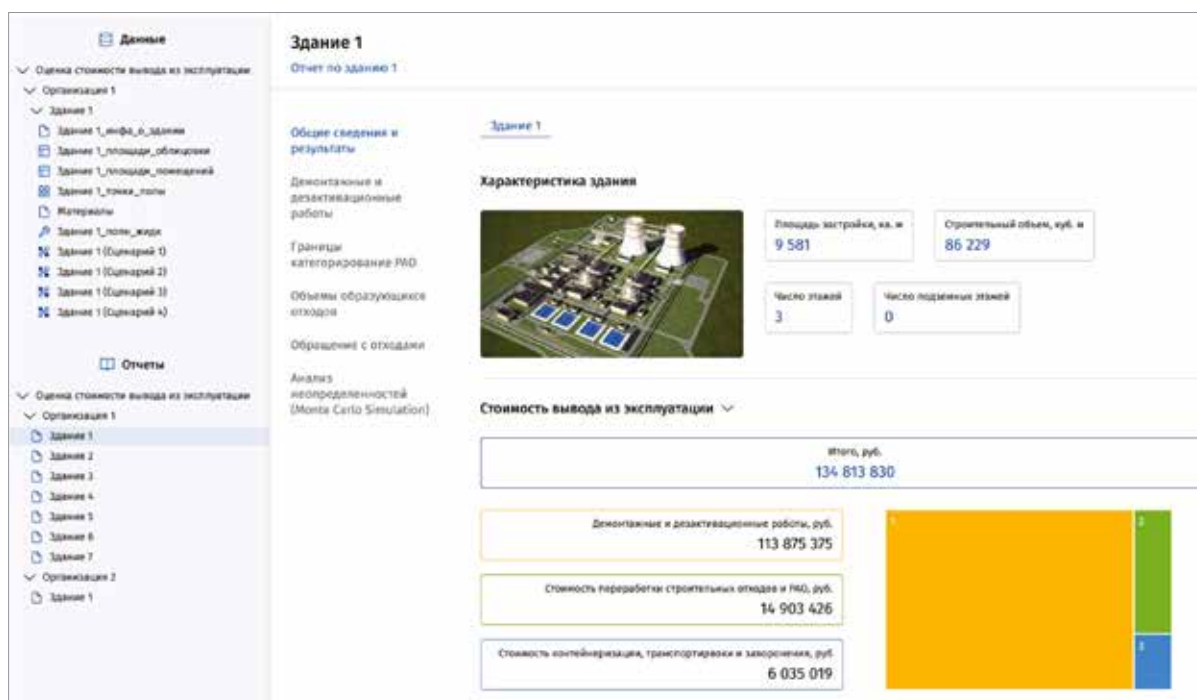


Рис. 2.2.4 – Фрагмент интерфейса «Decommissioning Smart Manager»

- оценивать эффективность технологий, выбранных для дезактивации загрязненных поверхностей и обращения с РАО;
- проводить динамическую оценку ресурсов, необходимых для реализации проекта по ВЭ, в том числе оценку нагрузки на инфраструктуру и оборудование (например, мощностей по обращению с образующимися отходами);
- выполнять анализ рисков и неопределённостей проекта;
- проводить оценку достаточности исходных данных для выполнения расчётов по оценке стоимости (с заданной точностью) и формирования рекомендаций по уточнению данных.

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

Продолжены работы по развитию законодательной и нормативной базы в области безопасного использования атомной энергии в рамках федерального проекта «**Разработка технологий управляемого термоядерного синтеза (УТС) 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, в том числе подразделений Института и ФБУ «НТЦ ЯРБ». В 2022 году:

- продолжены работы по анализу особенностей обеспечения безопасности, присущих термоядерным и гибридным системам. Проведен масштабный анализ влияния выбора конструкционных материалов и теплоносителей на безопасность установки. Проанализировано более **10** классов различных материалов для применения в различных узлах установок, а также **15** различных вариантов различных теплоносителей. Разработана концепция безопасности установок управляемого термоядерного синтеза;
- продолжены работы по созданию семейства расчетных кодов для решения задач анализа безопасности широкого спектра установок УТС. Завершена разработка и проведена подготовка к верификации двух программных средств для анализа безопасности установок управляемого термоядерного синтеза — кода **TRITIUM-F** для оценки миграции и накопления трития в технологических системах и кода нуклидной кинетики **TRACT-F** для оценки радионуклидных составов и радиационных характеристик материалов установок УТС. Код TRITIUM-F передан для опытной эксплуатации в АО «НИКИЭТ»;
- разработаны концепция и проект Федерального закона «О внесении изменений в Федеральный закон от 21.11.1995 № 170-ФЗ «Об использовании атомной энергии» в части законодательного обеспечения разработки и эксплуатации систем термоядерного синтеза, термоядерных и гибридных реакторов. Документы одобрены профильными секциями НТС Госкорпорации «Росатом» и Ростехнадзора и согласованы заинтересованными федеральными ведомствами и организациями;
- в рамках реализации дифференцированного подхода к регулированию установок УТС в соответствии с их уровнем потенциальной опасности выработаны подходы по отнесению термоядерных установок к отдельным видам объектов использования атомной энергии и с учётом проведенных предварительных оценок предложены оптимальные критерии, позволяющие обеспечить объективность и простоту категоризации установок;
- завершены исследования в поддержку **лицензирования установки МИН** (АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»). С применением вновь созданного программного и константного обеспечения выполнено более **150** расчетов для оптимизации радиационной защиты и обоснования пределов безопасной эксплуатации установки. Подготовленные материалы разделов обоснования радиационной безопасности одобрены экспертизой Ростехнадзора.

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

Основной объем работ по направлению выполнялся в части 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...».

Разработанные предложения по внесению изменений в Федеральный закон от 11 июля 2011 г. № 190-ФЗ «Об обращении с радиоактивными отходами ...» направлены на повышение эффективности обращения с РАО за счёт: актуализации требований к захоронению РАО, предусмотренных статьей 12; уточнения процедур финансирования захоронения РАО организаций, не эксплуатирующих особо радиационно опасные и ядерно опасные производства и объекты; учёта особенностей образования РАО при выводе из эксплуатации объектов использования атомной энергии.

Постановлением Правительства РФ от 29 октября 2022 г. N 1929 «О внесении изменений в постановление Правительства Российской Федерации от 19 октября 2012 г. N 1069» приняты изменения в критерии отнесения РАО к особым и удаляемым, критерии классификации удаляемых РАО, а также уточнены критерии отнесения твердых, жидких и газообразных отходов к РАО. В принятой редакции критериев отнесения РАО к особым РАО и удаляемым РАО установлена возможность отнесения к особым не только РАО, образовавшихся в результате выполнения государственной программы вооружения и государственного оборонного заказа, но и РАО, образовавшихся в результате мирного использования атомной энергии и при осуществлении деятельности по добыче и переработке минерального и органического сырья с повышенным содержанием природных радионуклидов. Также допустимо нахождение пункта хранения особых РАО и его санитарно-защитной зоны в границах населенных пунктов, особо охраняемых природных территорий, в случае если пункты хранения РАО введены в эксплуатацию до вступления в силу нормативных правовых актов, устанавливающих такие границы. В части критериев классификации удаляемых РАО определены допустимые значения содержания долгоживущих радионуклидов (бета-излучающих и альфа-излучающих) для РАО 3 и 4 классов, установлены ограничения по энерговыделению для РАО 2 класса, исключена неоднозначность отнесения РАО к 4 и 6 классам, обозначена первостепенность критериев приемлемости РАО для захоронения.

 *Изменения вступают в силу с 1 января 2024 года. В обоснование изменений решающую роль внесли специалисты ФБУ «НТЦ ЯРБ» и ИБРАЭ РАН.*

4. Комплексный мониторинг эффективности реализации ФЦП ЯРБ-2

Проведена масштабная работа по разработке обоснований для продления ФЦП ЯРБ-2 до 2035 г., связанного с дефицитом бюджетных средств в период 2021—2025 гг. (рис. 2.2.5). Выполнены переоценка стоимости и уточнение конечных результатов и целевых показателей ряда программных мероприятий, начало реализации которых перенесено на более поздний период или увеличен срок выполнения уже ведущихся работ.

Все обоснования внесения изменений в ФЦП ЯРБ-2 подготовлены с учетом бюджетных ассигнований, приоритетности работ, решений по рассмотренным вариантам конечных состояний объектов.

Продолжено развитие единой информационно-аналитической системы (ИАС ФЦП ЯРБ), в которой структурированы актуальные сведения реализации ФЦП ЯРБ-2 за 2016—2022 гг., отработаны средства подготовки оперативных и регламентированных отчетов (рис. 2.2.6).

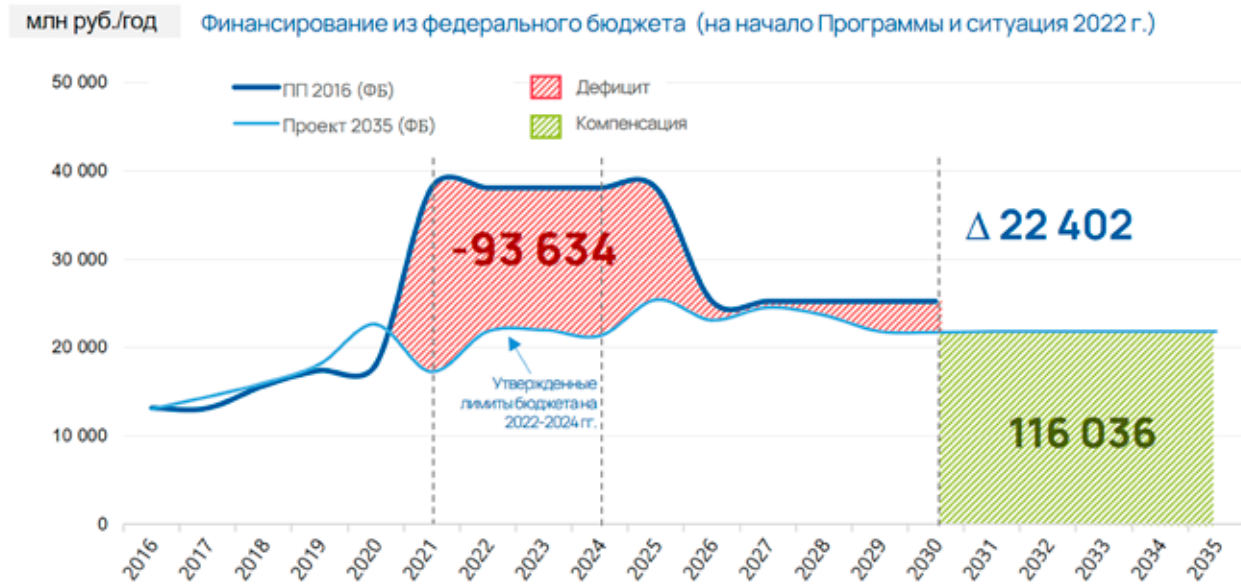


Рис.2.2.5 – Переоценка стоимости и продление ФЦП ЯРБ-2 до 2035 года



Рис. 2.2.6 – Структурированные данные ИАС ФЦП ЯРБ

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.

На основе данных ИАС ФЦП ЯРБ выполнялась аналитическая и методическая поддержка Госкорпорации «Росатом» при: оценке эффективности и результативности реализации мероприятий ФЦП ЯРБ-2 за 2022 г., расчёте целевых показателей и индикаторов, внесении изменений в Программу с учётом выделяемого финансирования, приоритетности работ, решений по рассмотренным вариантам конечных состояний объектов.

Завершилась проработка возможности повторного использования территорий ядерного наследия. Разработан стратегический мастер-план по переводу площадок Госкорпорации «Росатом» в целевое состояние для нового использования. Прогнозная финансовая модель, специально разработанная для создания мастер-плана, учитывает состояние

рынка недвижимости, ожидаемые изменения в объеме и сроках финансирования мероприятий ФЦП ЯРБ-2, позволяет выбрать инвестиционную модель для софинансирования проекта и построить оптимальный план-график выполнения всех мероприятий по ВЭ и новому строительству.

Внедрение новых перспективных технологических решений по выводу из эксплуатации ОИАЭ — еще одна тематика работ в повышении эффективности реализации мероприятий ФЦП ЯРБ-2. В 2022 году проведен поиск российских разработок, прототипов, технологий и оборудования для технологического развития процессов ВЭ, обращения с РАО и реабилитации РЗТ. Выбрано 15 организаций, технические решения которых представляют интерес для опробования и оценки возможных преимуществ и перспектив их внедрения [1]. В качестве пилотной площадки для проведения опробования выбран Московский филиал ФГУП «РАДОН».

Для достижения максимального результата от пилотного проекта его результаты будут публиковаться на сайте Российской сети по выводу из эксплуатации. Это новый информационный ресурс, разработанный ИБРАЭ РАН для всех участников работ по ВЭ, предназначенный для общения и обмена мнениями о новых разработках технологий и оборудования, отзывах о его использовании, проводимых испытаниях, ознакомления с чужими извлеченными уроками при выполнении работ по ВЭ.

5. Обеспечение публичности мероприятий в сфере ЯРБ.

В 2022 году организованы и проведены три технических тура на площадки реализации ФЦП ЯРБ-2 (рис 2.2.7):

1. Московский филиал ФГУП «РАДОН» (рисунок 2.2.8);
2. АО «ГНЦ РФ — ФЭИ»;
3. АО «ВНИИНМ» (рисунок 2.2.9),

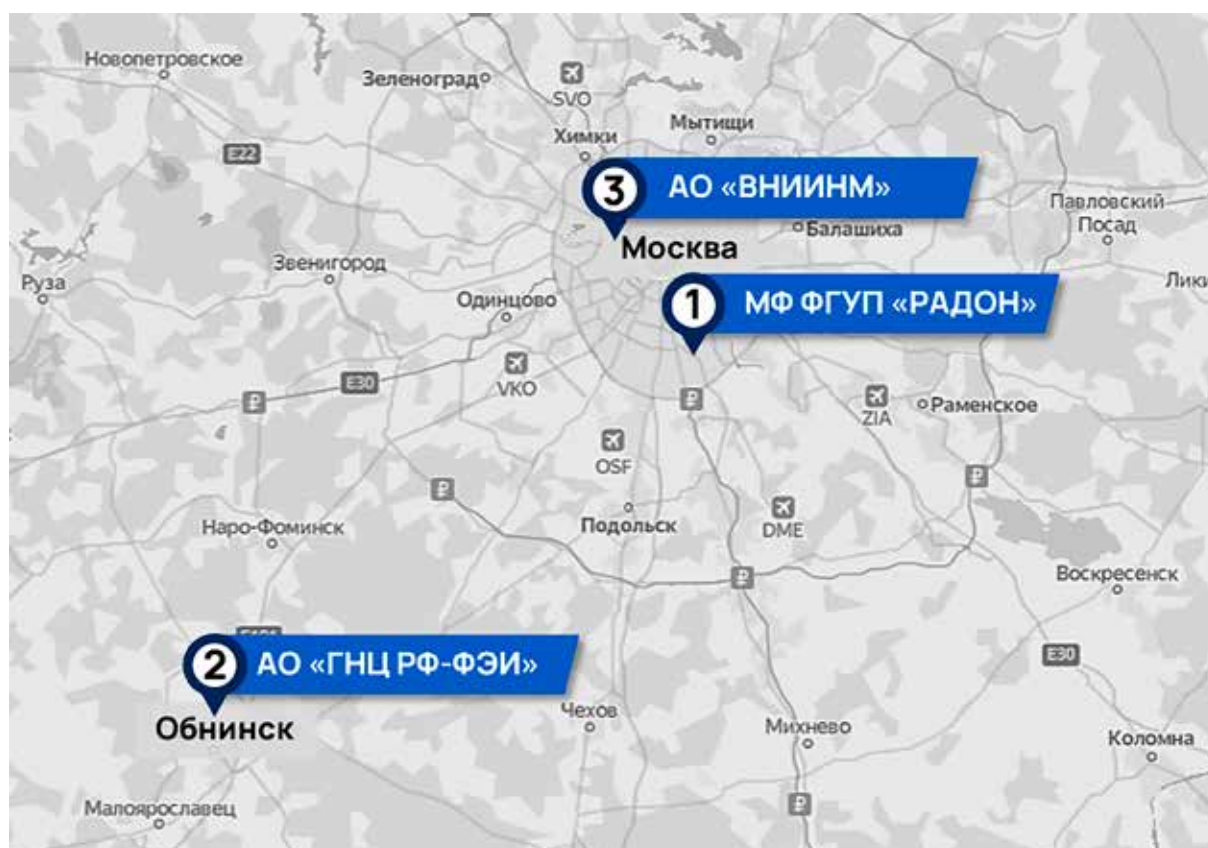


Рис. 2.2.7 — География текстур на площадке реализации ФЦП ЯРБ-2 в 2022 году



Рис. 2.2.8 – Текстур на площадку Московского филиала ФГУП «РАДОН»



Рис. 2.2.9 – Текстур на площадку АО «ВНИИНМ»

В мероприятиях приняли участие более **80** представителей общественности, экспертно-го научного сообщества и СМИ.

Итоги мероприятий и иные материалы о параметрах, ходе и результатах реализации ФЦП ЯРБ-2 представлены на сайте фцп-яруб.рф, в т.ч.:

- около **250 информационных материалов** о реализации Программы в 2022 году;
- **актуализированная информация о радиозэкологической обстановке в 20 регионах** реализации мероприятий Программы;
- **2 программных интервью** с руководителями отраслевых организаций.

Завершился цикл 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. Сотрудниками ИБРАЭ РАН осуществлена большая работа по подготовке материалов к **седьмому Совещанию Договаривающихся сторон и экспертной поддержке делегации Российской Федерации** в ходе совещания по рассмотрению Докладов. В Совещании, прошедшем с 27 июня по 8 июля 2022 года в штаб-квартире МАГАТЭ, приняли участие **750** делегатов, представляющих **76** стран, являющихся Договаривающимися сторонами Объединенной конвенции.

При подготовке к Совещанию были получены и рассмотрены доклады зарубежных стран, по которым подготовлено и отправлено более **200** вопросов и комментариев, а также получено более **180** вопросов к докладу Российской Федерации (рис. 2.2.10). Наиболее пристальный интерес зарубежных стран по-прежнему вызывают темы захоронения ЖРО в глубокие геологические горизонты («закачка»), обращения с ОЯТ и РАО (транспортировка и переработка, создание ПИЛ).

Впервые на основе Национального доклада Российской Федерации было определено несколько сфер деятельности, в которых компетентные органы Российской Федерации в области использования атомной энергии за отчетный период добились высоких результатов. Участниками совещания в качестве «good practice» был отмечен **значительный прогресс в реализации замкнутого топливного цикла**, в качестве «good performance» — успешное внедрение Единой государственной системы обращения с отработанным ядерным топливом и радиоактивными отходами, строительство централизованного комплекса по переработке ОЯТ, разработка требований к безопасности пунктов захоронения, содержащих РАО, не подлежащие восстановлению.

▶ *Как итог, в результате состоявшихся обсуждений было подчеркнуто, что все основные задачи, поставленные перед Российской Федерацией на предыдущем совещании Договаривающихся сторон в рамках Объединенной конвенции, выполнены.*

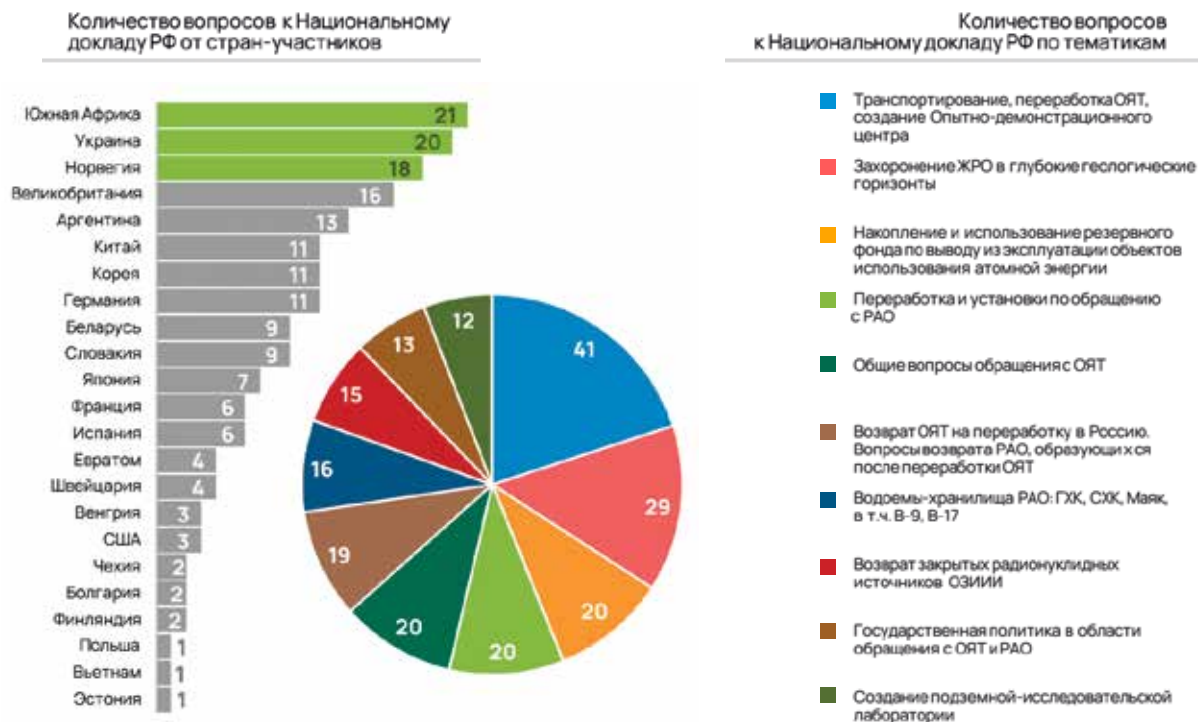


Рис. 2.2.10 – Количество и тематика вопросов к Национальному докладу Российской Федерации

КЛЮЧЕВЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАБОТ

- Ильясов Д.Ф. Методы оценки стоимости обращения с радиоактивными отходами в условиях неопределенности исходных данных // Радиоактивные отходы, 2022. – № 1 (18). – С. 16–27. – DOI: 10.25283/2587-9707-2022-1-16-27.
- Дорофеев А.Н., Уткин С.С., Мамчиц Е.Г., Самойлов А.А., Дорогов В.И. О представлении Шестого национального доклада Российской Федерации о выполнении обязательств, вытекающих из Объединенной конвенции о безопасности обращения с отработавшим топливом и о безопасности обращения с радиоактивными отходами // Радиоактивные отходы. 2022. – № 3 (20). – С. 10–18. – DOI: 10.25283/2587-9707-2022-3-10-18.
- Иванов А.Ю., Линге Ин.И. К вопросам цифровизации при обращении с радиоактивными отходами // Радиоактивные отходы, 2022. – № 4 (21). – С. 39–47. – DOI: 10.25283/2587-9707-2022-4-39-47.
- Ильясов Д.Ф., Иванов А.Ю., Агафонов Н.П., Михайленко А.А., Овчинников И.Д., Степанян П.О. Разработка программного обеспечения для оценки стоимости проектов по ликвидации ядерно и радиационно опасных объектов с применением цифрового моделирования // Теоретическая и прикладная экономика, 2022. – № 4. – С. 67–79. DOI: 10.25136/2409-8647.2022.4.38996.
- Бочкарёв В.В., Дорофеев А.Н., Курындин А.В., Линге И.И., Понизов А.В., Самойлов А.А., Уткин С.С., Шаповалов А.С., Шарафутдинов Р.Б. К вопросу внесения изменений в Постановление Правительства Российской Федерации от 19.10.2012 № 1069 «О критериях отнесения твердых, жидких и газообразных отходов к радиоактивным отходам, критериях отнесения радиоактивных отходов к особым радиоактивным отходам и к удаляемым радиоактивным отходам и критериях классификации удаляемых радиоактивных отходов» // Ядерная и радиационная безопасность, 2022. – № 4 (106). – С. 59–72. – DOI: 10.26277/SECNRS.2022.106.4.005.
- Тихонова А.А., Самойлов А.А., Ильина О.А., Иванов А.Ю., Белоусов С.В., Сергунин А.П., Ступин Р.С., Гребнева А.Д. Особенности процесса поиска и внедрения новых технологических решений по выводу из эксплуатации объектов ядерного наследия и обращению с образующимися при этом радиоактивными отходами // Радиоактивные отходы, 2022. – № 4 (21). – С. 90–102. – DOI: 10.25283/2587-9707-2022-4-90-102.
- Бирюков Д.В., Самойлов А.А., Фролова О.Б. К вопросу о взаимосвязи характеристик территорий с локальным радиоактивным загрязнением и необходимости их реабилитации // Радиация и риск (Бюллетень Национального радиационно-эпидемиологического регистра), 2022. – Т. 31. №. 1. – С. 105–114.



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)

Заведующий отделом — **П. А. Блохин**, к.т.н. (blokhin@ibrae.ac.ru);

Директор Красноярского филиала — **Д. А. Озёрский**, к.т.н. (oda@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.; **К. С. Казаков** (kks@ibrae.ac.ru), **Е. В. Муленкова** (mulenkova@ibrae.ac.ru) — геологические и гидрогеологические аспекты безопасности;

А. В. Расторгуев, к.т.н., **А. Ю. Озёрский**, к.г.-м.н., **Ю. И. Сабаев** — постановка и оценка гидрогеологических исследований;

В. А. Печатников (pechatnikov@ibrae.ac.ru), **С. Р. Невин** (nevin@ibrae.ac.ru) — эксплуатация экспериментальной установки для скважинных нагнетаний и мониторинга;

И. В. Капырин, к.ф.-м.н. (kapyrin@ibrae.ac.ru); **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), **В. В. Сускин**, к.т.н.; **Г. Д. Неуважаев**, к.т.н. — геомиграционное, геохимическое и термомеханическое 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), **В.Ю. Коновалов**, **А.В. Дёмин**, **Д.И. Павлов** — комплексные вопросы радиационной безопасности;

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;

С. В. Панченко (panch@ibrae.ac.ru); **А. М. Скоробогатов** (sam@ibrae.ac.ru), **А. А. Аракелян**; **Е. Г. Васильева**, к.т.н. — проблемы радиозэкологии и реабилитации;

Д. В. Крючков, к.т.н. (dvk@ibrae.ac.ru) **А. И. Блохин**, к.ф.-м.н. (bai@ibrae.ac.ru); **Ю. Е. Ванеев**, 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: Григорьев Ф.В., Ширнин М.Ю., Ануприенко Д.В., Смирнов К.Д., Рукавичникова А.А., Казиева С.Т., Бутов Р.А., Соболев Д.А.

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

- 1 ОБОСНОВАНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ЗАХОРОНЕНИЯ РАО
- 2 РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ РАСЧЁТНО-МЕТОДИЧЕСКОГО ИНСТРУМЕНТАРИЯ ОЦЕНКИ БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТОВ ЯТЦ
- 3 ОБОСНОВАНИЕ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РЕАБИЛИТАЦИИ ТЕРРИТОРИЙ

ОСНОВНЫЕ ИТОГИ 2022 ГОДА

1. Обоснование безопасности глубинного захоронения РАО

Создание подземной исследовательской лаборатории

- Совместно со специалистами ИГЕМ РАН, СПБО ИГЭ РАН, Геофизического центра РАН, ИФЗ РАН, АО «Красноярскгеология» и др. продолжены активные работы по доизучению площадки сооружения подземной исследовательской лаборатории и зоны потенциального влияния ПГЗРО (рис. 2.2.11—2.2.13).



Рис. 2.2.11 – Ввод в эксплуатацию нового оборудования и вагона-здания



Рис. 2.2.12 – Проведение совместных полевых экспериментов с представителями Санкт-Петербургского отделения ИГЭ РАН



Рис. 2.2.13 – Отбор образцов керна

Основные результаты полевого сезона 2022 года, полученные на основе откачки из отдельных интервалов скважин с использованием однопакерной компоновки установки для скважинных нагнетаний и мониторинга:

- подтверждение факта, что массив сформирован практически водонепроницаемыми породами, а отдельные интервалы в принципе не обладают признаками фильтрации;
- результаты исследований, полученные АО «Красноярскгеология» в 2010—2014 гг. при геологоразведочных работах, в связи с использованием менее совершенных пакеров, как правило, несколько завышены по отношению к результатам, полученным в 2021—2022 гг. ;
- результаты интерпретации указывают на то, что проведенные откачки характеризуются малыми радиусами влияния, а радиусы нагнетаний, по-видимому, не превышают первых дециметров от скважины, что позволяет судить о проницаемости пород только в околоскважинной зоне;
- отработаны методические приемы формирования гидрогеологической документации как в отношении первичных документов, так и в отношении баз данных, достаточные для проведения расчётов и применения результатов в прогнозных модельных построениях при оценке долговременной безопасности.

Сформированы **планы развития системы долговременных наблюдений** для формирования базы данных процессов, событий и явлений природного и техногенного характера.

Разработан **ультразвуковой каротажный скважинный зонд**, предназначенный для работы в разнонаправленных сухих и водозаполненных скважинах. Зонд состоит из трех взаимозаменяемых модулей (излучающего и двух приемных), каждый из которых содержит ультразвуковой преобразователь, защитные направляющие и систему пневматического прижима (рис. 2.2.14).

Выполнены работы по обустройству профиля для проведения геодинимического мониторинга. В частности:

- создание профилей высокоточного нивелирования, в т.ч. проходящих по площадке строительства ПИЛ — для проведения наблюдений за вертикальными подвижками земной поверхности. Установлено **23** грунтовых и **7** глубинных реперов в составе двух профилей;
- восстановление **34** имеющихся и установка **5** новых ГНСС-пунктов — для отслеживания горизонтальных подвижек (рис. 2.2.15).

Специалисты ИБРАЭ РАН совместно с представителями ФГУП «НО РАО», экспертами Научно-исследовательского института проблем экологии (НИИПЭ), ИГЕМ РАН, научных организаций Сибирского федерального округа, а также представителями экологических, общественных организаций, органов власти и СМИ приняли участие в Круглых столах

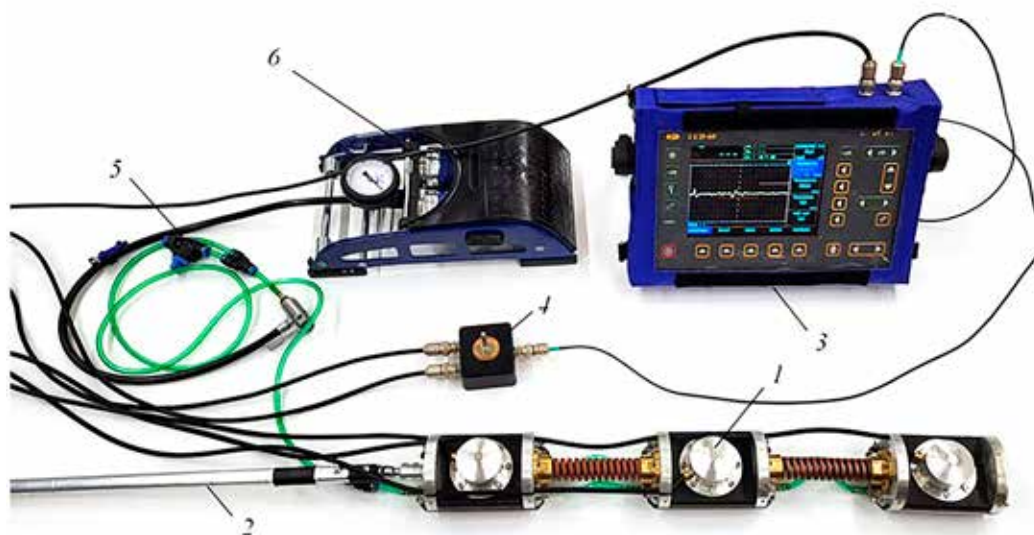


Рис. 2.2.14 — Общий вид скважинной каротажной установки: 1 — ультразвуковой каротажный зонд; 2 — досылочная штанга; 3 — блок обработки сигналов; 4 — коммутатор; 5 — воздушный клапан; 6 — пневматический насос



Рис. 2.2.15 — Размещение знаков наблюдательной сети



Рис. 2.2.16 – Обсуждение материалов обоснования лицензии на сооружение ПИЛ

по обсуждению материалов обоснования лицензии на сооружения ПИЛ. Каждый из туров проходил в г. Железногорске и в г. Красноярске на базе информационного центра по атомной энергии (рис. 2.2.16).

Работы по СБЯТЦ

В рамках работы над сбалансированным ЯТЦ был разработан концептуальный проект ПЗРО (рис. 2.2.17), оценены объемы РАО, приведенных к критериям приемлемости для захоронения, выполнен детализированный тепловой расчёт при загрузке отходов. Исходя из принятой компоновки ПЗРО и принятых граничных температур (для бентонитового буфера — до 150, для вмещающей породы — до 100 градусов Цельсия) допустимое энерговыделение РАО (на момент закрытия ПЗРО) было оценено как ~ 1 кВт/м³ стекломатрицы КФ.

Также были проведены идентификация и параметризация релевантных сценариев эволюции ПЗРО. Полученные результаты показывают, что для большинства рассмотренных радионуклидов их концентрация в грунтовых водах не превысит значения, соответствующего 100 мкЗв/год при условии использования воды в качестве питьевой (рис. 2.2.18).

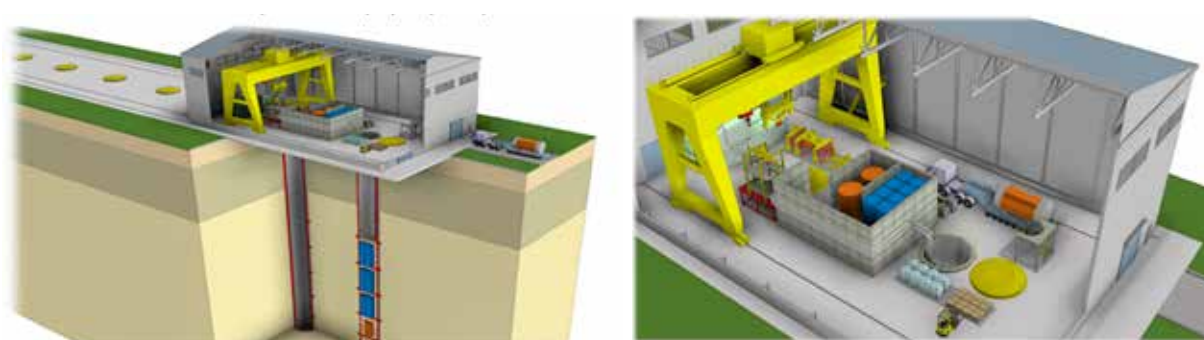


Рис. 2.2.17 – Концептуальный проект ПЗРО

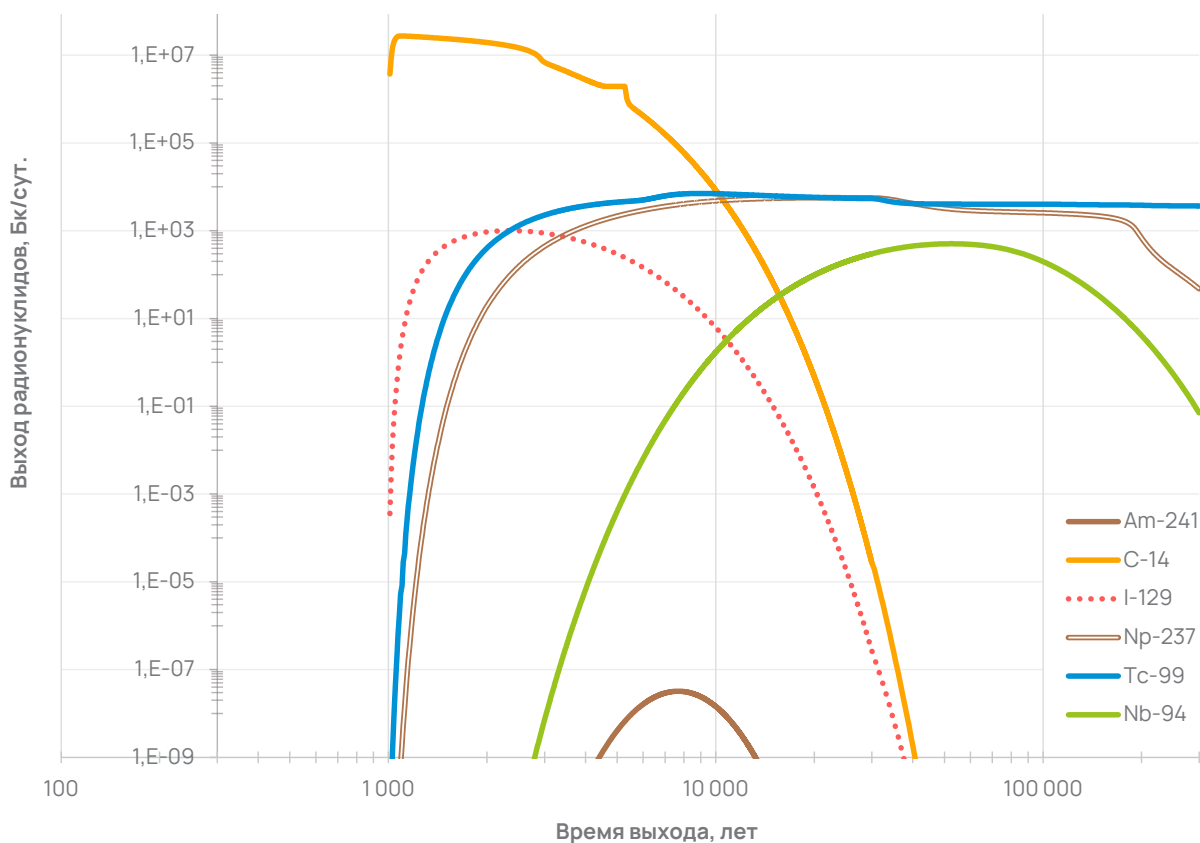


Рис. 2.2.18 — Зависимость выхода радионуклидов (Бк/сут.) за пределы ИББ от времени (годы)

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

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

1. **FENIA** — 3D-расчёты теплового режима, напряжённо-деформированного состояния и прочности объектов, в том числе находящихся внутри вмещающей среды.
2. **RELTRAN** — прогнозирование последствий атмосферных радиоактивных выбросов.
3. **GeRa** — 3D-гидрогеологическое моделирование.
4. **КОРИДА** — интегральный расчёт нейтронно-физических характеристик реакторных установок и доз облучения для населения и персонала.
5. **MOUSE** — учёт неопределённостей в процессе численного моделирования.

Их возможности охватывают весь спектр практических потребностей численного обоснования безопасности и активно используются для решения важных для отрасли задач. Так, в 2022 году:

- выполнены исследования в рамках лицензирования установки МИН (ГНЦ РФ ТРИНИТИ);
- продолжены работы по сопровождению аттестации FENIA/V.1 и КОРИДА/V.1;
- активно развивались средства для проведения **взаимосвязанных расчётов** по различным расчётным кодам для анализа чувствительности и неопределённостей (КОРИДА—MOUSE, GeRa—MOUSE и FENIA—MOUSE). Одно из перспективных направлений — расчётные исследования, направленные на определение требований к проведению КИРО для обеспечения вывода из эксплуатации объектов ядерного наследия.

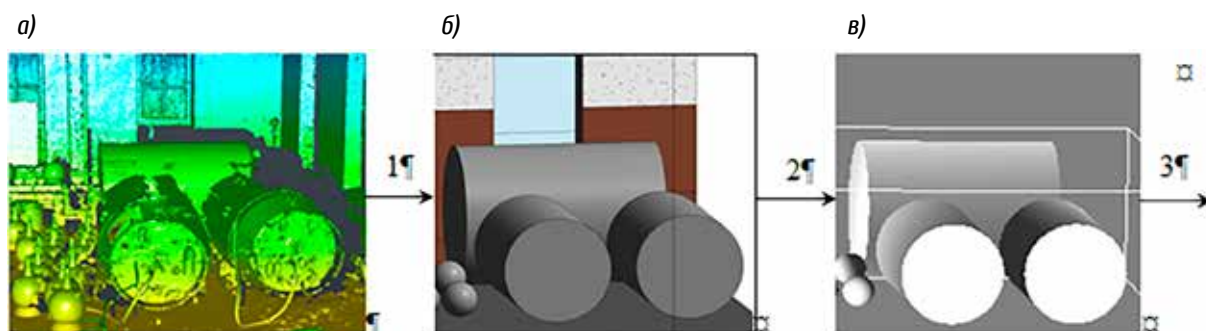


Рис. 2.2.19 – Виды моделей помещения с оборудованием на этапах 1–2 их преобразований:

а – «облако точек» от ЛС; б – оцифрованная модель в среде Revit; в – модель в среде GRATOR; 3 – переход к конвертации в расчетную модель

- разработано **5 РИД** (программ для ЭВМ), а результаты разработок и применения программ опубликованы в **8** статьях. Также получены **акты внедрения** результатов расчетов от АО «НИКИЭТ» о внедрении результатов расчета кодами GeRa/V2 и Экорад-АК-ВА/V1 и от АО «Техснабэкспорт» о внедрении FENIA, GeRa, КОРИДА.
- поданы на **аттестацию модули расчета нормативов допустимых сбросов радиоактивных веществ** и оценки доз облучения населения при различных сценариях водопользования в составе ПС ЭКОРАД. Продолжается работа по развитию модуля оценки доз на референтные виды биоты. Начата разработка кросс-платформенного интерфейса для всех модулей семейства ЭКОРАД. Созданы региональные базы радиозологических данных.
- в рамках обоснования безопасности или оптимизации технических решений по ВЭ созданы и **усовершенствованы модели 5 объектов**. С применением кодов **GeRa** и **ЭКОРАД** с участием АО «НИКИЭТ» модернизированы модели и проведены расчеты распространения радионуклидного загрязнения подземных вод от бассейнов выдержки 1-го и 2-го блоков Белоярской АЭС. Для проекта АО «Техснабэкспорт» с применением разработанных моделей FENIA проведен расчет теплового режима модельного ПЗРО, с применением моделей GeRa проведен расчет миграции радионуклидов за пределы барьеров безопасности ПЗРО для захоронения короткоживущей фракции ВАО, с применением ПК КОРИДА выполнены оценки радиационных характеристик ОЯТ и последующего формирования требований к короткоживущей фракции ВАО.
- в рамках развития РПК решались и принципиально новые задачи — цифровизация всех стадий обоснования безопасности и создание современных информационных инструментов для прикладных задач ЗСЖЦ.
- впервые разработана технология конвертации данных ЦИМ для построения сеточных моделей, а также структура единой базы данных справочных параметров, форматов хранения и передачи данных для разрабатываемых расчетных средств.
- реализована возможность **конвертации данных лазерного сканирования объектов** в формат графического редактора **ПК КОРИДА** с последующей конвертацией в формат расчетных моделей для программы **TDMCC** (рис. 2.2.19).

В большинстве работ 2022 года по обоснованию безопасности ключевые расчеты сопровождались реализованным при помощи **MOUSE** анализом чувствительности результатов к параметрам модели (рис. 2.2.20), а оптимизационные методы из состава MOUSE применялись для калибровки гидрогеологических моделей и моделей химических процессов в барьерных материалах (рис. 2.2.21).



Рис. 2.2.20 – Результаты анализа чувствительности при помощи MOUSE на примере трехмерной модели площадки планируемого ПЗРО

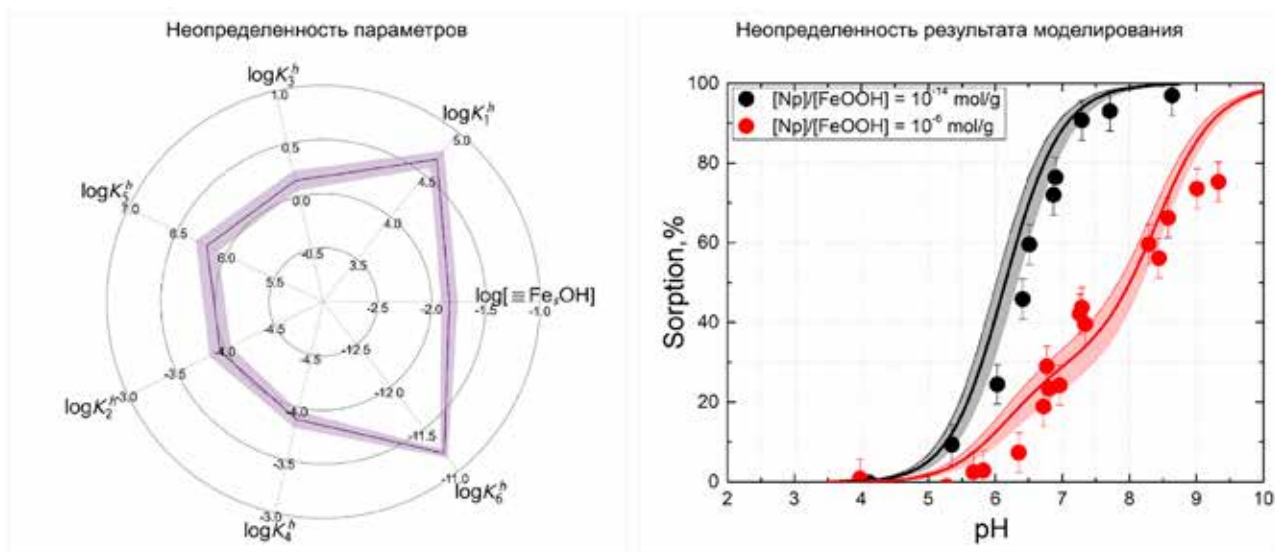


Рис. 2.2.21 – Результаты калибровки модели сорбции: показана неопределённость оптимальных параметров и соответствующий разброс результатов расчёта

Для кода GeRa:

- Разработаны и внедрены методы построения линий тока на трехмерных неструктурированных сетках. Новая технология позволяет, не выполняя расчёта задачи переноса, быстро построить пути миграции загрязнения в подземных водах, определить области разгрузки загрязненных подземных вод и оценить время прихода фронта загрязнения в контрольные точки. Она может быть также использована для определения поясов зон санитарной охраны водозаборов с помощью обращения поля скоростей.

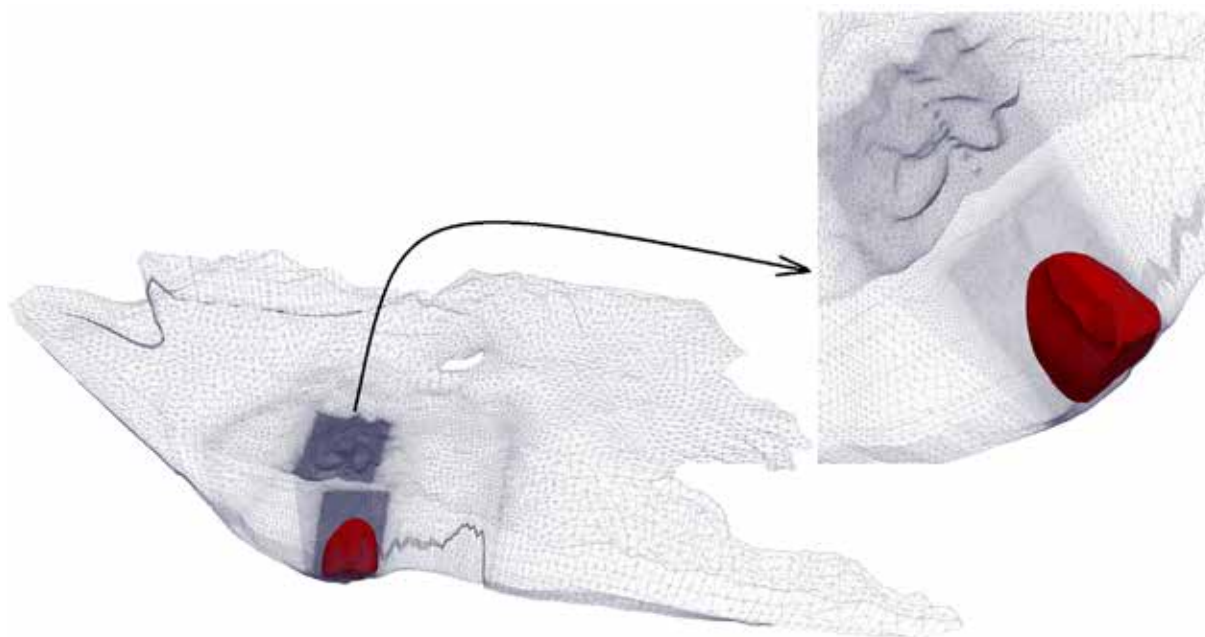


Рис. 2.2.22 – Расчётный ореол распространения высокоплотного раствора нитрат-иона в эксплуатационном горизонте (увеличено в 10 раз по вертикали)

- Внедрена и протестирована **модель биологической нитратредукции**, актуальной для безопасности ПГЗ ЖРО в силу высокой концентрации нитрат-иона в ЖРО. Учет этого процесса в моделях показывает уменьшение ореола распространения нитратного загрязнения со временем.
- Проведены расчеты **плотностной конвекции** на ПГЗ ЖРО «Северный» на мелкой сетке в параллельном режиме на вычислительном кластере (рис. 2.2.22) для оценки эффектов численной диффузии и плотностной конвекции. Показано, что на временах эксплуатации ПГЗ ЖРО плотностная конвекция существенно влияет на положение ореола отходов, в то же время численная диффузия не оказывает значительного влияния на результат (на более крупной сетке выводы аналогичны).
- Продолжена разработка **модели пороупругости для оценки протекания взаимосвязанных процессов фильтрации подземных вод и деформации пористых сред**. Новым является метод итерационного расщепления, при котором поочередно решаются задачи фильтрации и упругости. Расчёты в параллельном режиме показали, что метод расщепления может проявить лучшую масштабируемость и сократить время расчётов



2—5 февраля 2022 г. в рамках V Школы-семинара состоялся учебный курс по коду GeRa, разработанному в рамках проекта «Коды нового поколения» проектного направления «Прорыв». Школа проходила в г. Димитровград в НКЦ им. Е.П. Славского. Курс включал в себя лекции и практические занятия под руководством специалистов-разработчиков кода.

по сравнению с ранее реализованным монолитным подходом. Разработанный расчётный модуль готовится к внедрению в программный комплекс GeRa.

- Усовершенствована **модель фильтрации и переноса в трещиновато-пористой среде DFM** (англ. discrete fracture and matrix): реализована дискретизация потоков на трещинах с помощью многоточечной **О-схемы**, обеспечивающей сходимость на неортогональных сетках произвольного вида, и разработана схема расщепления по физическим процессам, позволяющая решать сопряжённую задачу течения и переноса по трещинам с учётом химических процессов осаждения-растворения. DFM модель можно использовать как для учёта крупных разрывных нарушений в моделях дальней зоны захоронений в кристаллических горных породах, так и для моделирования процессов деградации инженерных барьеров безопасности (например, вымывания трещин в бетоне).

3. Обоснование радиационной безопасности при реабилитации территорий

Выполнен анализ радиационной безопасности территории склона правого берега р. Москвы, прилегающей к промплощадке Московского завода полиметаллов, оценены дозы на население и персонал при проведении работ по реабилитации. Также разработаны: сценарии эволюции территории (рис. 2.2.23), в том числе рассмотрены различные варианты проведения реабилитационных работ, а также использования территории и водопользования р. Москвы в период после консервации; современные трехмерные расчётные геомиграционные и геофильтрационные модели. На их основе были выполнены многовариантные расчёты потенциальных доз облучения для населения и персонала.

На основании проведённого анализа были разработаны рекомендации по обеспечению радиационной безопасности при реабилитации территории правого берега р. Москвы.

Продолжаются работы по сравнительной оценке радиационных и химических рисков в районах расположения предприятий Госкорпорации «Росатом». В 2022 году оценки выполнены для Белоярской АЭС и АО «ИРМ». Как и в иных случаях, показан пренебрежимо малый вклад современной деятельности предприятий атомного кластера в г. Заречном в общую структуру техногенного риска.

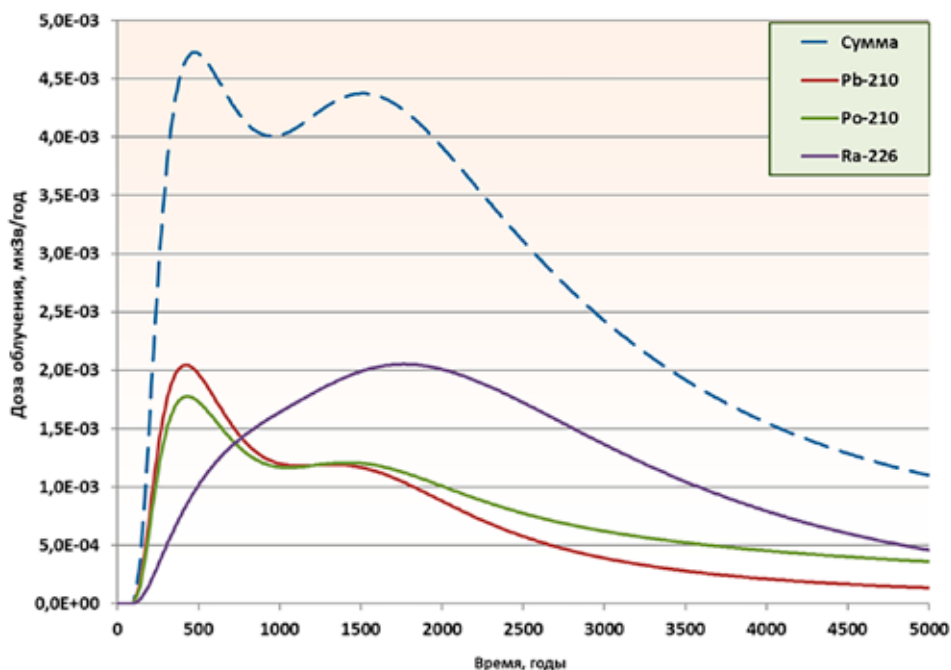


Рис. 2.2.23 — Динамика доз облучения для населения в долгосрочной перспективе при возможном водопользовании р. Москвы для одного из сценариев эволюции

КЛЮЧЕВЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАБОТ

1. U(VI), Np(V), Eu(III) sorption on goethite: A wide-ranging multiradionuclide dataset and uncertainty-aware parametrization of surface complexation models / Romanchuk A., Svitelman V., Blinov P., Larina A., Nevolin I., Egorov A., Saveleva E., Kalmykov S. // *Frontiers in Nuclear Engineering*. 2022, Vol. 1, P. 969171. DOI: 10.3389/fnuen.2022.969171.
2. Обращение с неопределенностями в задачах расчетного обоснования долговременной безопасности / Е.А. Савельева, В.С. Свительман // *Радиоактивные отходы*, 2022. — № 3(20). — С. 61–71. — DOI: 10.25283/2587-9707-2022-3-61-71.
3. Озерский Д.А., Гупало В.С., Казаков К.С., Неуважаев Г.Д. Изучение параметров геологического массива в рамках создания и эксплуатации подземной исследовательской лаборатории на участке «Енисейский» в Красноярском крае // *Радиоактивные отходы*, 2022. — № 4 (21). — С. 78–89. — DOI: 10.25283/2587-9707-2022-4-78-89.
4. Аракелян А.А., Блохин А.И., Блохин П.А., Ванеев Ю.Е., Казиева С.Т., Кизуб П.А., Кондаков В.Г., Панченко С.В., Сипачёв И.В. Развитие программного комплекса КОРИДА и опыт его применения при решении задач обращения с ОЯТ и РАО // *Радиоактивные отходы*. 2022, — № 3 (20). — С. 107–116. — DOI: 10.25283/2587-9707-2022-3-107-116.
5. Блохин А. И., Блохин П. А., Казиева С. Т., Сипачев И. В. Валидация программы нуклидной кинетики TRACT для оценки радиационных характеристик ОЯТ и РАО, «Радиоактивные отходы», № 4 (21), с.48-57
6. И.В. Капырин. Расчетные коды для гидрогеологического моделирования в задачах оценки безопасности ОИАЭ // *Радиоактивные отходы*, 2022. — № 2 (19). — С. 105–118.
7. Ю.Н. Токарев, Е.В. Моисеенко, Н.И. Дробышевский, Р.А. Бутов Точное аналитическое решение нестационарной задачи расчета полей температур и механических напряжений в двухслойном цилиндре и его применение для верификации численных моделей // *Теплофизика высоких температур*, 2022. — Т. 60, № 2, — С. 249–259.
8. Кочкин Б.Т., Богатов С.А. Перспективы использования скважинной концепции для удаления РАО в России // *Радиоактивные отходы*, 2022. — № 2 (19). — С. 85–99. — DOI: 10.25283/2587-9707-2022-2-85-99.
9. Болдырев К.А., Соболев Д.А., Кочкин Б.Т., Баринов А.С. Использование результатов изучения природных и исторических аналогов для оценки поведения материалов барьеров безопасности при обосновании безопасности захоронения радиоактивных отходов // *Радиоактивные отходы*, — 2022. — № 3 (20). — С. 72–96. — DOI: 10.25283/2587-9707-2022-3-72-96.

1

2

3

4

5

6



СТРАТЕГИЧЕСКОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ И ПРОЕКТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ В ОБЛАСТИ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ



НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ
НАПРАВЛЕНИЯ

Советник РАН

А. А. Саркисов

академик РАН



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 2022 году

- 1 ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
- 2 РАЗВИТИЕ БАЗЫ ДАННЫХ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЕКТАМИ ПО ПОВЫШЕНИЮ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НА ОБЪЕКТАХ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

ОСНОВНЫЕ ИТОГИ 2022 ГОДА

1. Прогноз распространения и оценка воздействия на окружающую среду радионуклидов при аварии ЯЭУ в Кольском заливе и в пр. Певек

Морская доктрина РФ предусматривает создание и эксплуатацию мощного и безопасного атомного ледокольного флота с ЯЭУ большой мощности для Северного морского пути. Но с ростом мощности реакторных установок растет и величина нарабатываемой ими активности и, соответственно, в случае аварии — величина возможного аварийного радиоактивного выброса. При разработке новых атомных судов проводятся рассмотрение и расчёты сценариев и последствий самых различных проектных и запроектных аварийных ситуаций и реализуются меры для минимизации выхода радионуклидов за пределы за-

щитных барьеров. Тем не менее, задача оценки последствий возможных гипотетических (пренебрежимо маловероятных или практически не реализуемых) аварий и анализа возможных мер по их минимизации в конкретной обстановке регионов Северного морского пути является актуальной. Сформировавшееся в ИБРАЭ РАН целостное представление о развитии нестандартных событий в малой атомной энергетике было расширено в исследованиях, которые проводились в 2020—2022 гг. при поддержке гранта Российского научного фонда (проект №20-19-00615). Представленные ниже результаты моделирования относятся к оценке последствий гипотетических ядерных аварий, которые крайне маловероятны, но полностью не исключены при эксплуатации современных и перспективных транспортных ЯЭУ.

В качестве основных регионов для анализа были выбраны район расположения ФГУП «Атомфлот» в Мурманске, пролив Певек и Восточно-Сибирское море.

Сегодня большинство атомных судов базируется в Мурманске на ФГУП «Атомфлот» (ЯЭУ тепловой мощностью от 3,5 до 175 МВт). Среди них а/л «Арктика» с реакторной установкой РИТМ-200М, а в перспективе и ледоколы «Лидер» с РУ РИТМ-400 (2×315 МВт). Поэтому необходимо спрогнозировать, учесть и проанализировать последствия даже самых маловероятных (гипотетических) возможных аварийных ситуаций.

Прогноз распространения радионуклидов в атмосфере

В ходе данной работы изучались сценарии различных аварий на ЯЭУ, рассчитывались выход за пределы защитных барьеров и перенос в атмосфере и воде радиоактивных веществ при выбросе их на различные высоты, распространение и оседание на подстилающую поверхность, перенос течениями и т.д. При этом использовалась разработанная в ИБРАЭ РАН система ПАРРАД, включающая транспортную модель NOSTRADAMUS и региональную гидродинамическую WRF-ARW. Для адаптации модели WRF-ARW к Арктическому региону были подготовлены расчётные области 4000×4000 км с шагом 55 км и 100×100 км с шагом 0,6—4 км и с временным интервалом от 1 ч до 2 суток. В качестве начальных и краевых условий использовали результаты прогноза модели NCAR/NCER с интервалом 3 ч по сетке 55 км. Подстилающую поверхность брали из спутниковых наблюдений (разрешение 0,9 км) и базы данных GMTED и MODIS. Распространение радиоактивных веществ с ФГУП «Атомфлот» вдоль Кольского залива рассчитывали по метеоданным, полученным по модели WRF-ARW.

Расчёты проводили по двум сценариям. Первый, учитывающий индивидуальные коэффициенты выхода радионуклидов из ядерного топлива в пределах 0,02—50% от накопленных, базируется на данных по утилизации реакторов АПЛ первых поколений. Второй предусматривает выброс за пределы объекта 100% каждого выбранного радиоэкологически опасного радионуклида после полной разгерметизации реактора при СЦР. Отметим, что данный сценарий не реалистичен и не может быть реализован в действительности (т.к. вся активность не может быть полностью выброшена из ЯЭУ), но был рассмотрен для сравнения с первым и для оценки «сверху» величины возможного выброса.

Результаты прогноза. Кольский залив и Баренцево море

Мощность экспозиционной дозы (МЭД) и объёмная активность воздуха после аварии сильно зависят от особенностей рельефа местности. Наименьшие МЭД совпадают с низинами 5—10 м, наибольшие — с высотами 179, 162 м (и могут превышать допустимые для населения уровни). Дозовая нагрузка на население определялась в соответствии с НРБ-1990-2009 и СП 2.6.1.1292-2003. Показано, что в зоне наблюдения (ЗН) превышение допустимого уровня дозы составит от полутора до нескольких раз. Для защиты населения потребуется реализация всех существующих предусмотренных мер. Меры по ограничению проживания населения на загрязнённой территории определены по плотности радиоактивного загрязнения ^{137}Cs и годовой дозе в диапазоне выбросов из ЯЭУ, характерных для всех типов атомных судов ФГУП «Атомфлот». Показано также, что даже при нереалистичном сценарии с выбросом 100% ^{137}Cs на радиоактивном следе не возникают области отчуждения, но на некоторых участках побережья Баренцева моря может

потребуется отселение жителей. В более реалистичных предположениях (мощность выброса будет составлять не более 1 ПБк), отселения жителей не потребуются.

Характерное время загрязнения акватории Кольского залива составит около 2 часов. Радиоактивная морская вода залива станет выноситься течением в Баренцево море на удаление от нескольких км до десятков км.

Прогнозы показали, что потребуются меры защиты на удалении до 50 км от источника выброса.

Результаты прогноза. Пролив Певек и Восточно-Сибирское море

Прогноз выполнен для схожего выброса (мгновенный выброс ^{137}Cs активностью 3,7 ПБк на высоту 70 м). При средней скорости ЮВ ветра 2—3 м/с за 15—20 часов радиоактивное облако пересекло бы пролив Певек, о-в Роутан и вышло в Восточно-Сибирское море на десятки км, расширившись с 3—5 км в проливе Певек до 40—60 км в открытом море.

Рассеяние на его внешних границах достигло по НРБ-2000/2009 допустимой среднегодовой объемной активности (ДОА) для населения на уровне 27 Бк/м³ по ^{137}Cs . В связи с меньшей скоростью ветра и большей высотой прибрежной полосы (15—50 м) расчётное поверхностное загрязнение о-ва Роутан оказалось заметно выше, чем загрязнение территории Кольского залива на таком же удалении от ФГУП «Атомфлот».

Под воздействием течения в проливе Певек примесь выносится вдоль восточного берега пролива Средний в Восточно-Сибирское море. При этом из-за небольших глубин поверхностное течение переносит ^{137}Cs быстрее (общая глубина 30 м). В этих условиях поверхностное загрязнение морской воды остается в разы выше по сравнению с содержанием примеси на нижележащем горизонте.

Прогноз распространения радионуклидов в акваториях Баренцева и Восточно-Сибирского морей

Проводился с использованием модели океана ИВМИО от источников, сформированных в результате осаждения радиоактивных веществ (РВ) на подстилающую поверхность акваторий и выноса РВ из Кольского залива в Баренцево море и из пролива Певек в Восточно-Сибирское море.

Кольский залив и Баренцево море

В период времени 5—10 суток после формирования источника происходит перемешивание загрязнения в верхних слоях акватории, на которую выпали осадения в результате аварии. Общая площадь загрязнения с концентрацией ^{137}Cs выше ПДК на двух приповерхностных горизонтах оценена в несколько тыс. км². Площадь акватории с загрязнением свыше 10 ПДК составляла на тех же горизонтах от 100 до 130 км². Оба следа протянулись вдоль оси выпадения от выхода из Кольского залива в направлении Новой Земли.

В течение следующего отрезка времени (15—30 суток) для выбранных сценарных условий пятно сверхнормативного загрязнения на приповерхностных горизонтах сократилось и частично сместилось в восточном и юго-восточном направлениях. Площадь загрязнения с уровнем выше 10 ПДК сократилась до 30—60 км² (рис. 2.2.24 а—в).

В дальнейшем пятно расширялось и смещалось в основном в восточные сектора акватории, а пятно сверхнормативного загрязнения поверхности сокращалось и через 4 месяца исчезало (рис. 2.2.24 г—е).

Восточно-Сибирское море

ПАТЭС «Академик Ломоносов» оснащена реактором КЛТ-40 с тепловой мощностью 135 МВт. Расчёты распространения радионуклидов в океане, как и в предыдущих случаях, были проведены для величины выброса 3,7 ПБк.

Согласно расчётам через 5 суток после аварии основная часть загрязнения приходится на поверхностный слой океана. Через 10 суток эти пятна загрязнения сокращаются и ча-

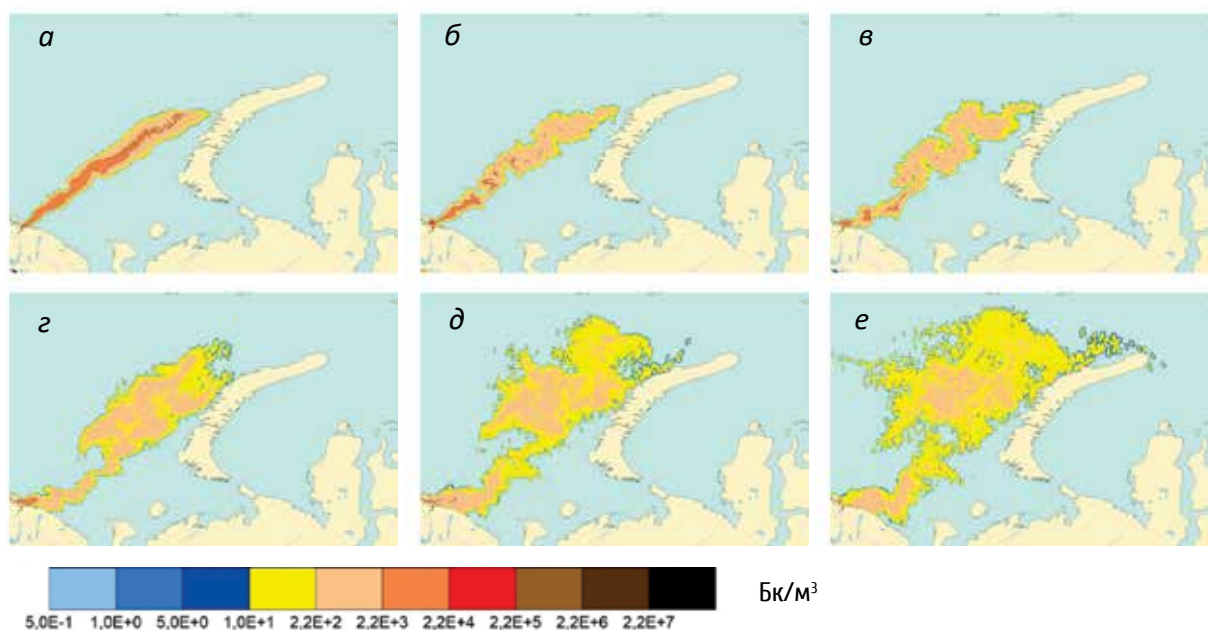


Рис. 2.2.24 – Пятна загрязнения поверхностного слоя воды в Баренцевом море через 5 (а), 15 (б), 30 (в), 60 (г), 90 (д) и 120 (е) суток после аварии с выбросом 3,7 Пбк ^{137}Cs

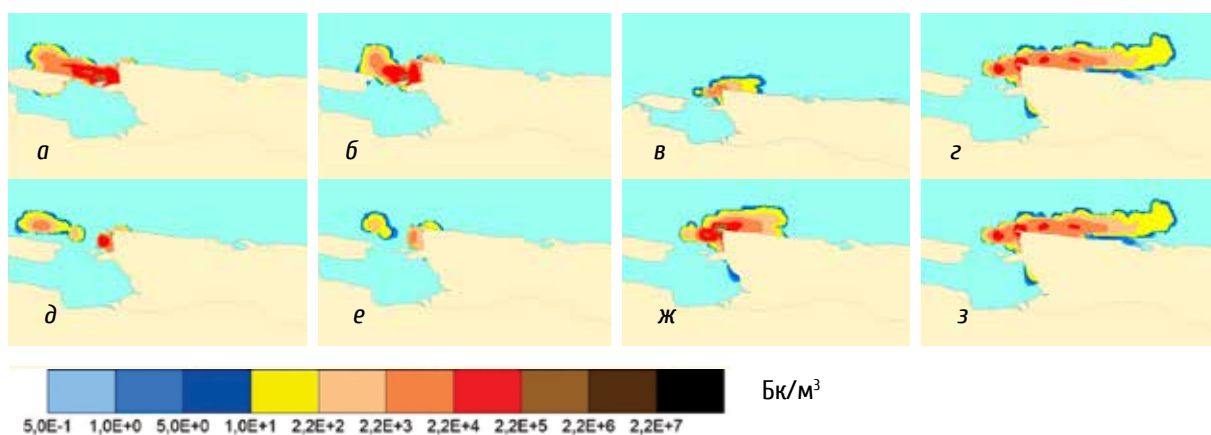


Рис. 2.2.25 – Пятна загрязнения на поверхности (а–г) и на глубине 12–20 м (д–з) в Восточно-Сибирском море через 5 (а, д), 10 (б, е), 30 (в, ж) и 60 (г, з) суток после аварии

стично перемещаются на нижележащий горизонт 12—20 м. Через месяц основные загрязнения погружаются на горизонт 12—20 м, а их площади сокращаются соответственно до 750, 450, и 200 км². Через 2 месяца загрязнения свыше 1 и 10 ПДК сохраняются на обоих уровнях (рис. 2.2.25).

В дальнейшем площади загрязнений постепенно сокращаются. Загрязнение с уровнем до 10 ПДК площадью ~ 150 км² сохраняется на поверхности и через год после аварии, а загрязнение с уровнем свыше 1 ПДК наблюдается даже через 2 года после аварии, его площадь составляет ~ 100 км². При этом пятна загрязнений распространяются в основном на север и запад от места выброса.

Результаты модельных расчётов распространения радионуклидов от гипотетических аварий и оценки последствий загрязнения окружающей среды могут служить одной из основ разработки и создания системы радиационного мониторинга и аварийного реагирования. Все эти три системы (моделирования переноса, мониторинга обстановки и аварийного реагирования), работающие вместе, позволят минимизировать отрицательные последствия возможных аварий (или избежать их вовсе).

2. База данных информационной системы управления проектами (ИСУП). Пользовательский интерфейс

На предыдущем этапе работы была создана **ER-модель** специальной базы данных по проблемам РБ на объектах РАН. Для снижения рисков, связанных с санкциями, ER-модель была реализована в **PostgreSQL** — свободно распространяемой объектно-реляционной СУБД, для чего разработана новая **SQL-инструкция** на диалекте **Postgres Structured Query Language** (pgSQL). Вновь сформированная база данных (БД) насчитывает 42 таблицы в 7 блоках. На данном этапе внесены правки в структуру БД и разработан пользовательский интерфейс для нескольких ролей пользователей информационной системы управления проектами (ИСУП). На разработанную БД получено свидетельство от 07.07.2022 г. о её государственной регистрации № 2022621626 (рис. 2.2.26). При этом проведена миграция заполненных таблиц из MS SQL.

Для разработки пользовательских интерфейсов и отчетных форм выбран **Django** — свободный фреймворк для веб-приложений на языке **Python**, использующий шаблон проектирования «Модель-Вид-Контроллер» (MVC).

Авторизация и роли пользователей

В ходе анализа процесса разработки программы повышения радиационной безопасности (ППРБ) идентифицировано 5 основных ролей, которые определяют права пользователей на просмотр и корректировку информации — от администратора БД, имеющего максимальные права до исполнителя, которому доступна только информация по выполняемому им договору.

Общий вид ИСУП

Главная страница ИСУП (рис. 2.2.27) отражает сущности БД: Организации, Проблемы, Договоры, Экспертиза с разделённым на блоки функционалом. В правой части экрана указываются последние действия авторизовавшегося пользователя.

Каждое наименование на рис. 2.2.27 является ссылкой, при клике на которой пользователю выводится информационная таблица, позволяющая увидеть соответствующую карточку сущности (Организации, Проблемы, Договоры, Приоритезации) со всеми общими данными. Заголовки таблиц позволяют сортировать записи по клику.

Для добавления новой информации или редактирования существующей предусмотрены столбцы с пиктограммами, оформленными в виде ссылок, позволяющих перейти к действиям. При добавлении или корректировке пользователь последовательно заполняет ряд страниц. Всё заполнение сводится к последовательному внесению информации в таблицы БД в соответствии с их иерархической структурой, поэтому пользователю можно



Рис. 2.2.26 — Свидетельство о государственной регистрации БД



Рис 2.2.27 – Фрагмент экрана общего вида ИСУП

предлагать выбор конкретного шага и переводить его на страницу с информацией, которую он хочет обновить.

Была также проведена модернизация путём доработки и адаптации к условиям проблемы радиационной безопасности объектов РАН ранее созданной в рамках разработки Стратегического Мастер-плана утилизации АПЛ «Информационной системы управления программой» (ИСУП), которая позволит эффективно планировать, организовывать реализацию и осуществлять контроль исполнения необходимых работ по повышению радиационной безопасности на объектах РАН и образовательных учреждений высшего образования Министерства науки и высшего образования РФ.

На рис. 2.2.28 показана схема информационных потоков применения ИСУП для планирования и выполнения работ в рамках ППРБ.

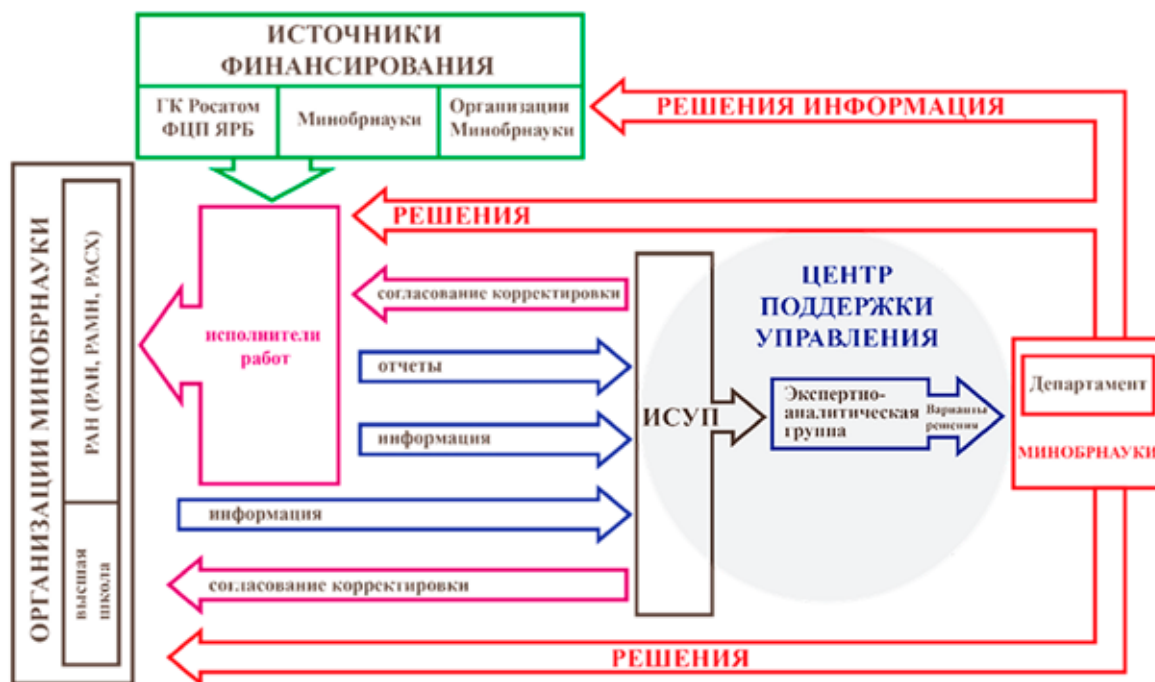


Рис. 2.2.28 – Схема информационных потоков применения ИСУП для планирования и выполнения работ по повышению РБ в научных организациях РАН и образовательных учреждениях высшего образования Министерства науки и высшего образования РФ

В ходе дальнейших работ по развитию ИСУП целесообразно провести её опытную эксплуатацию с внесением детальной информации по актуальным проблемам, выполняемым и перспективным работам для отработки процедуры приоритизации и формированию шаблонов основных отчётных документов по ППРБ для передачи вышестоящим организациям.

3. Актуализация ППРБ

Информация для внесения в базу данных ИСУП была получена путем обработки и анализа специальных формуляров, заполненных и присланных институтами РАН в ответ на соответствующие запросы ИБРАЭ, направленные в организации по поручению Минобрнауки. Эта работа позволила уточнить и актуализировать информацию о состоянии радиационной безопасности в **59** научных организациях РАН и в **22** образовательных учреждениях высшего образования, подведомственных Министерству науки и высшего образования РФ.

На основании анализа ответов на посланные запросы установлено, что количество проблемных вопросов, решение которых позволит ликвидировать выявленные дефициты радиационной безопасности и связанные с ними проблемы, превышает **700**. Оценка стоимости работ, необходимых для устранения выявленных дефицитов безопасности, показывает, что при сохранении сегодняшних темпов и масштабов финансирования данного направления для реализации физических, инженерных и ремонтных работ потребуется более **20** лет. Проблемные вопросы по повышению РБ, связанные с организацией обучения, повышения квалификации и аттестации персонала, при этом не учитывались.

Общее количество планируемых проектов составило **740**, из них **486** в научных организациях РАН и **254** в образовательных учреждениях высшего образования Минобрнауки РФ. Здесь в соответствии с общепринятой терминологией проектного управления под проектом понимается группа взаимосвязанных работ, необходимых для полного решения одной конкретной проблемы в области РБ на конкретном объекте. Реализация проекта будет означать ликвидацию данной проблемы.

В 2022 году в соответствии с требованиями ФНП РФ по РБ были приведены **26** помещений для работы с ИИИ, РВ и РАО в **4** организациях РАН.

В некоторых случаях для проведения работ потребовались новые инженерно-технические решения. Так, при отсутствии достоверной информации, строительной и эксплуатационной документации по помещению № 149 лаборатории Геохимии радиоактивных элементов в ИГМ СО РАН выполнена консервация технологических шахт и устройство наливных полов со специальным покрытием, которое соответствует всем современным требованиям ФНП РФ по РБ к помещениям для работы с РВ и РАО (рис. 2.2.29).

Стратегические подходы к эффективному решению проблемы ликвидации угроз от радиационно опасных объектов и территорий и результаты выполнения работ по повышению РБ в научных организациях РАН докладывались и обсуждались на международной конференции «Состояние и перспективы развития инфраструктуры обеспечения вывода из эксплуатации ядерно и радиационно опасных объектов, обращения с радиоактивными и промышленными отходами, отработавшим ядерным топливом в государствах — участниках СНГ» 2 августа 2022 года в Москве (рис. 2.2.30).



Рис. 2.2.29 — Технологические шахты в помещении №149 до консервации (слева) и после проведения работ (справа)



Рис. 2.2.30 — Выступление заместителя директора ИБРАЭ РАН Антипова С.В. по проблемам ликвидации угроз от радиационно опасных объектов и территорий

КЛЮЧЕВЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАБОТ

1. Саркисов А.А., Антипов С.В., Высоцкий В.Л., Дзама Д.В., Билашенко В.П., Кобринский М.Н., Хохлов И.Н., Шведов П.А., Губенко И.М., Рубинштейн К.Г., Игнатов Р.Ю., Калантаров В.Е. Припачкин Д.А. Радиационные и радиологические последствия гипотетической ядерной аварии на атомном объекте в районе расположения ФГУП «Атомфлот» //Атомная Энергия, 2023 г., т. 133, вып. 4, с. 229-238
2. Саркисов А.А., Смоленцев Д.О., Антипов С.В., Билашенко В.П., Шведов П.А. Перспективы использования атомных энергетических технологий в Арктике. //Арктика: экология и экономика, №3, 2022 г.
3. Билашенко В.П. Атомная энергетика – угроза или средство выживания // Радиозлектронные технологии, №3 2022 г.

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.

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.



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)



Заведующий
отделением

С. Л. Гаврилов

(gav@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 ПРОЕКТИРОВАНИЕ, РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ ОБЪЕКТОВЫХ И ТЕРРИТОРИАЛЬНЫХ СИСТЕМ РАДИАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ И ОПЕРАТИВНОГО РЕАГИРОВАНИЯ НА ЧС С РАДИАЦИОННЫМ ФАКТОРОМ.
- 4 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

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);

С. А. Шикин — проектирование объектовых и территориальных автоматизированных систем радиационного контроля;

А. Е. Пименов — вопросы аварийного радиационного контроля и спектрометрии.

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

ОСНОВНЫЕ ИТОГИ 2022 ГОДА

1. Развитие моделей атмосферного переноса (Киселев А.А., Коняев П.А., Рубинштейн К.Г.)

В 2022 г. в работах отделения развития систем аварийной готовности и реагирования особое внимание было уделено разработке и совершенствованию моделей для оценки анализа и прогноза доз населения при атмосферных выбросах радиоактивных веществ в атмосфере. Их развитие охватило все основные задачи, необходимые для обеспечения радиационной безопасности населения при атмосферных радиоактивных выбросах, включая вариантный анализ возможных доз облучения при нормальной эксплуатации ОИАЭ и в случае радиационных аварий. Разработаны программные модули для:

- проведения расчётного анализа зон планирования защитных мероприятий в соответствии с отечественными и зарубежными рекомендациями и требованиями (рис. 2.3.1);
- оценки мест расположения постов АСКРО с учётом характерных метеорологических условий местности, селитебности территорий и других ограничений, затрудняющих эффективное функционирование АСКРО;
- расчётной оценки доз на население от штатных выбросов с учётом возможностей наложения разовых выбросов, связанных с технологическими операциями на ОИАЭ;
- расчётной оценки доз на население за счёт потребления продуктов питания местного производства с учётом региональных особенностей.

Также продолжена разработка системы ансамблевого прогноза для решения задач оперативного реагирования с учётом комплекса неопределённостей, возникающих на острой фазе развития аварий. В ходе работы проведены исследования по:

- развитию моделей сухого и влажного осаждения, учитывающих дисперсную структуру аэрозоли, показавшие необходимость учёта данного фактора при моделировании атмосферного переноса;
- определению свойств мультимодельного ансамбля моделей влажного осаждения, позволяющих учесть системным образом неопределённости, связанные с несовершенством моделей при описании физических процессов;

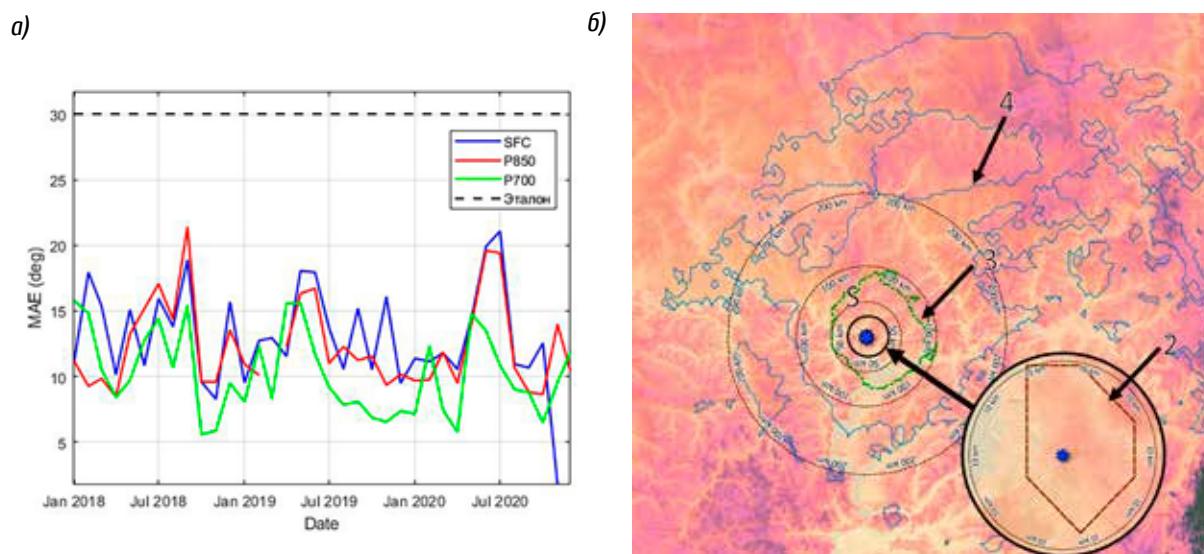


Рис. 2.3.1 – Результаты оценки метеополей за несколько лет и критерий приемлемости результатов моделирования (а) и расчетное распределение построенных по нормам МАГАТЭ зон планирования защитных мероприятий для постулируемой аварии с учетом атмосферных течений, характерных для площадки размещения объекта (б)

- анализу многолетних метеорологических полей для Калининской, Балаковской, Курской, Нововоронежской АЭС, показавшие устойчивую работу численной модели прогноза погоды и возможность получения с её помощью достоверных данных для проведения ретроспективных исследований или прогнозного анализа возможных доз облучения населения для задач обоснования безопасности АЭС в части атмосферных выбросов.

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

При решении задач оценки последствий выполнения планируемых работ по демонтажу объектов, находящихся на заключительных стадиях жизненного цикла (ЗСЖЦ), необходимым является комплексный анализ. Он включает оценку возможного радиологического воздействия на население при проведении работ по демонтажу с образованием пыли, загрязненной радиоактивными веществами, которая может попасть в атмосферу через негерметичные швы и/или через системы вентиляции, в связи с чем реализуется атмосферный перенос радиоактивности и должна быть оценена степень её воздействия на население. Примерами таких работ, выполненных в 2022 году и являющихся логическим продолжением работ 2021 года, являются: оценка характеристик загрязнения территории и доз облучения населения г. Северска и г. Томска в результате планируемых работ по выводу из эксплуатации двух производственных зданий АО «ОДЦ УГР»; оценка характеристик загрязнения территории и доз облучения населения г. Кирово-Чепецк (рис. 2.3.2) и г. Кирова в результате планируемых работ по выводу из эксплуатации шести производственных корпусов промплощадки Приволжского филиала ФГУП «РАДОН» (ПФ ФГУП «РАДОН»).

В качестве исходных данных при оценке запасов активности использовались данные по количеству РАО различных категорий, находящихся на площадках, а также результаты комплексного инженерного и радиационного обследования объектов.

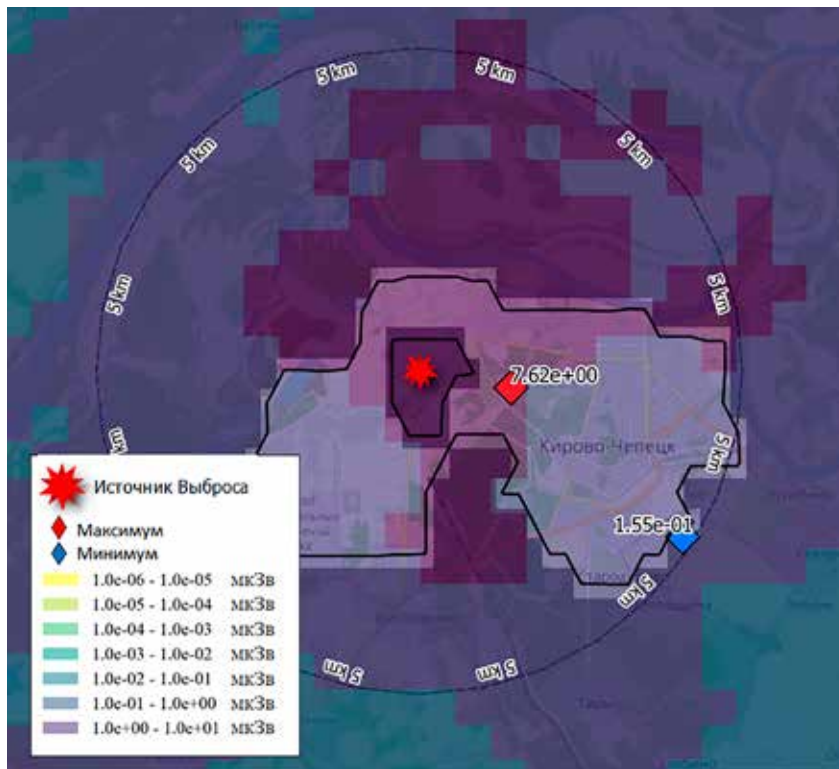


Рис. 2.3.2 – Прогноз возможного распределения полной среднегодовой эффективной дозы облучения населения по территории г. Кирово-Чепецк для возрастной группы «дети 12–17 лет», мкЗв, и точки максимума (красный ромб) и минимума (синий ромб) для сценария демонтажа производственных корпусов ПФ ФГУП «РАДОН» продолжительностью 4 года при наихудших погодных условиях

Для проведения расчётного анализа для такого класса задач была разработана методология, реализованная в виде комплекса программных средств. Принципиальным отличием от ранее применявшихся подходов является детализированный учёт географических особенностей расположения объекта, окружающих территорий, влияющих на отклонение направления переноса (например, воздушные потоки вдоль русел рек, орография и т.д.), суточные и сезонные переносы воздушных масс, а также учёт графика производственного процесса. В работе 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 расчёты атмосферного переноса и доз облучения для основных сценариев: на основе среднегодовых значений концентраций и выпадений и с использованием технологии смещения времени начала выброса, что позволило определить наименее благоприятные условия выброса и получить соответствующие оценки неопределённости прогноза.

Несмотря на то, что результаты расчётов во всех случаях показали, что годовые дозы облучения населения за счёт 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 методология позволяет проводить углубленное исследование возможного воздействия на население на этапе планирования работ по выводу из эксплуатации ОИАЭ в части применяемых видов и инструментов демонтажа, методов пылеподавления, способов хранения мусора и отходов и т.д. с целью минимизации дозовой нагрузки на население.

3. Разработка малогабаритного автономного дозиметра гамма-излучения для беспилотного летательного аппарата на основе миниатюрного сцинтилляционного детектора на базе кремниевого фотоумножителя (Si-ФЭУ) (Антоний Е.В., Гаврилов С.Л., Гайдук В.В., Исаев А.Б., Шикин С.А.).

В 2022 году продолжились работы по разработке малогабаритного автономного дозиметра гамма-излучения для БПЛА — по разработанной в 2021 году документации был изготовлен контроллер (рис. 2.3.3).

Выполнено макетирование устройства с платой контроллера. По результатам макетирования приняты решения по доработке конструкции корпуса.

Подготовлено техническое задание на разработку программного обеспечения для работы контроллера.

Программное обеспечение контроллера должно позволять:

- получать и обрабатывать данные от сцинтилляционного детектора;

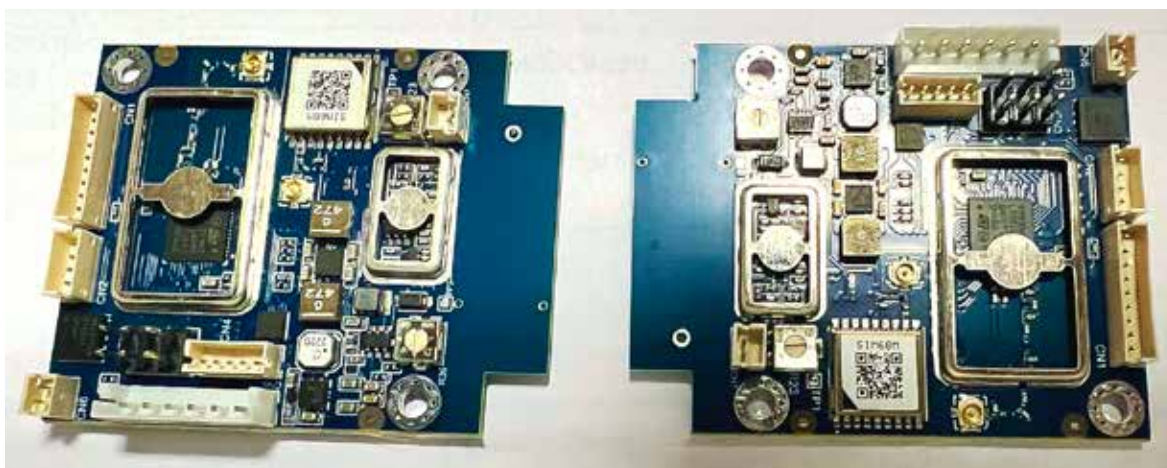


Рис. 2.3.3 — Внешний вид исполнения платы контроллера

- определять географические координаты по спутниковому сигналу ГЛОНАСС/GPS, также определять высоту полета по данным барометрического датчика, встроенного в контроллер;
- управлять электропитанием устройства;
- осуществлять обмен измеренными значениями по радиоканалу с наземной станцией;
- осуществлять обмен данными с компьютером по USB.

4. Модернизация программно-технической инфраструктуры в ЦНТП ИБРАЭ РАН (Антоний Е.В., Киселев А.А., Гайдуков В.В., Акимова И.Г.)

В связи разработкой и внедрением в деятельность Центра научно-технической поддержки ИБРАЭ РАН нового программного обеспечения мониторинга радиационной обстановки, а также обновленного программного обеспечения для оценки и прогноза параметров радиационной обстановки, требующего существенного увеличения вычислительных ресурсов (рис. 2.3.4-2.3.5), в 2022 году начаты работы по замене серверного, телекоммуника-

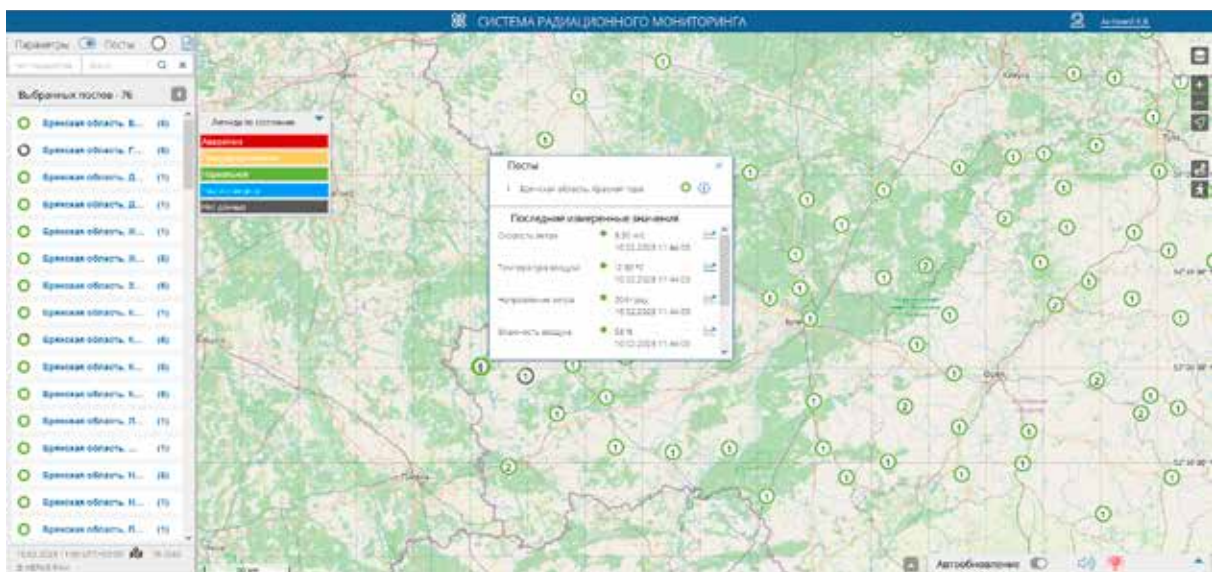


Рис. 2.3.4 – Новое программное обеспечение для визуализации данных мониторинга радиационной обстановки в ЦНТП ИБРАЭ РАН «Веди-мониторинг»

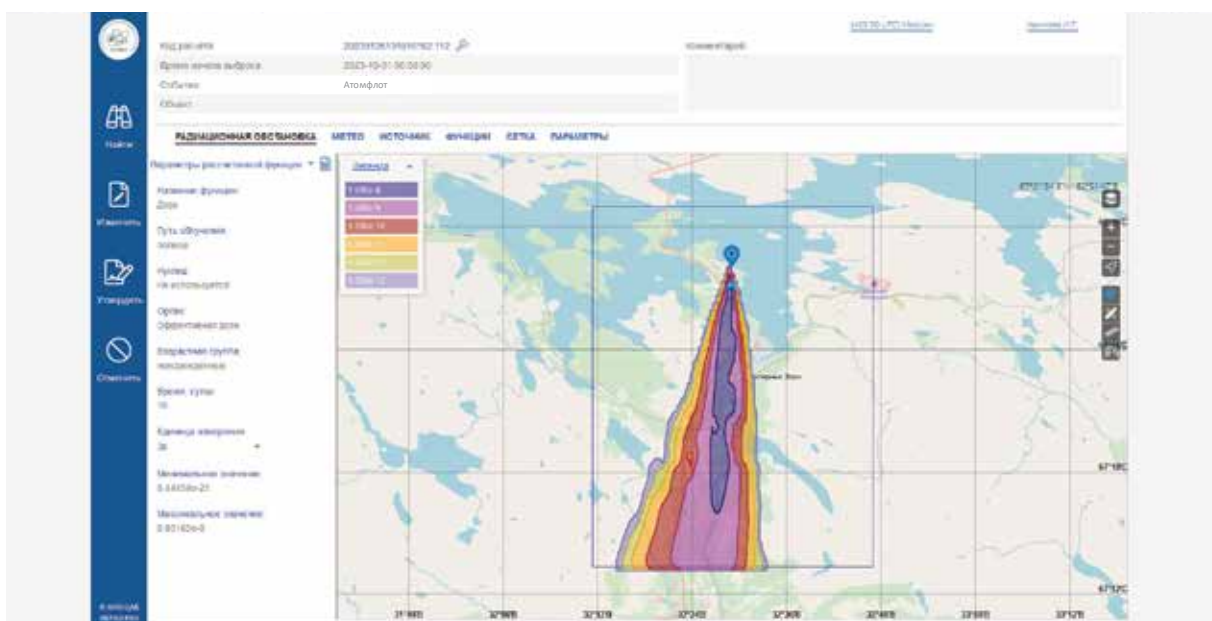


Рис. 2.3.5 – Обновленное программное обеспечение для оценки и прогноза параметров радиационной обстановки в ЦНТП ИБРАЭ РАН

ционного оборудования для задач ЦНТП ИБРАЭ РАН, а также ввод в эксплуатацию нового программного обеспечения для мониторинга радиационной обстановки и обновленного программного обеспечения для оценки и прогноза параметров радиационной обстановки. Всё используемое в ЦНТП ИБРАЭ РАН программное обеспечение является либо свободно распространяемым (которого не коснулись санкции в отношении Российской Федерации), либо внесено в реестр российского программного обеспечения (системное ПО).

5. Разработка малогабаритного автономного программно-аппаратного модуля контроля радиационной обстановки (МРКА-И1) (Гаврилов С.Л., Антоний Е.В., Гайдуков В.В., Клёмин А.С., Шикин С.А.)

Новым результатом 2022 года стала разработка малогабаритного автономного программно-аппаратного модуля контроля радиационной обстановки. Основное назначение **МРКА-И1** — измерение параметров радиационной обстановки в процессе перевозки радиоактивных отходов с привязкой к географическим координатам, хранение измеренных данных на локальных носителях и их передача на сервер сбора данных автоматизированной системы радиационного мониторинга, в состав которой входит изделие. МРКА-И1 может размещаться на автомобилях сопровождения автотранспорта перевозки радиоактивных отходов. МРКА-И1 может применяться и для любых других задач, связанных с измерениями с географической привязкой и передачей данных в режиме реального времени. В качестве блока детектирования используется стандартный дозиметр **ДБГ-С11Д**, включенный в единый государственный реестр средств измерений и широко представленный на российском рынке, что позволяет удешевить стоимость поставки данного модуля.

Краткие технические характеристики МРКА-И1 (рис. 2.3.6, 2.3.7):

- диапазон МАЭД гамма-излучения — от **0,1** мкЗв/ч до **10** мЗв/ч;
- диапазон энергий регистрируемого гамма излучения — от **0,1** до **1,5** МэВ;
- продолжительность автономной работы МРКА-И1 при отсутствии внешнего питания — не менее **24** часов;

Рабочие условия эксплуатации модуля МРКА-И1:

- диапазон рабочих температур — от **-20** до **+50**°С;
- степень защиты, обеспечиваемая оболочками модуля МРКА-И1 от проникновения твёрдых предметов и воды, по ГОСТ 14254-96 — IP65;
- масса модуля МРКА-И1 — не более **2,9** кг.



Рис. 2.3.6 — Малогабаритный автономный программно-аппаратный модуль контроля радиационной обстановки

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

В 2022 году были полностью завершены работы по созданию аварийно-технического центра Объединенного института ядерных исследований (АТЦ ОИЯИ) в г. Дубне (Московская область), включающего в себя также созданные в 2021 году автоматизированную систему контроля радиационной обстановки в окрестностях ОИЯИ (рис. 2.3.8) и передвижную радиометрическую лабораторию.

В состав АТЦ ОИЯИ входят следующие подсистемы:

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

В настоящее время осуществляется научно-техническая поддержка со стороны ЦНТП ИБРАЭ РАН по эксплуатации систем АТЦ ОИЯИ (рис. 2.3.9).

В 2022 году основные усилия в работах по данному направлению были сосредоточены на:

- разработке и применении программных средств моделирования переноса РВ в атмосфере для оценки, анализа и прогноза радиационной обстановки как для задач обоснования безопасности ОИАЭ, так и для задач оперативного реагирования;

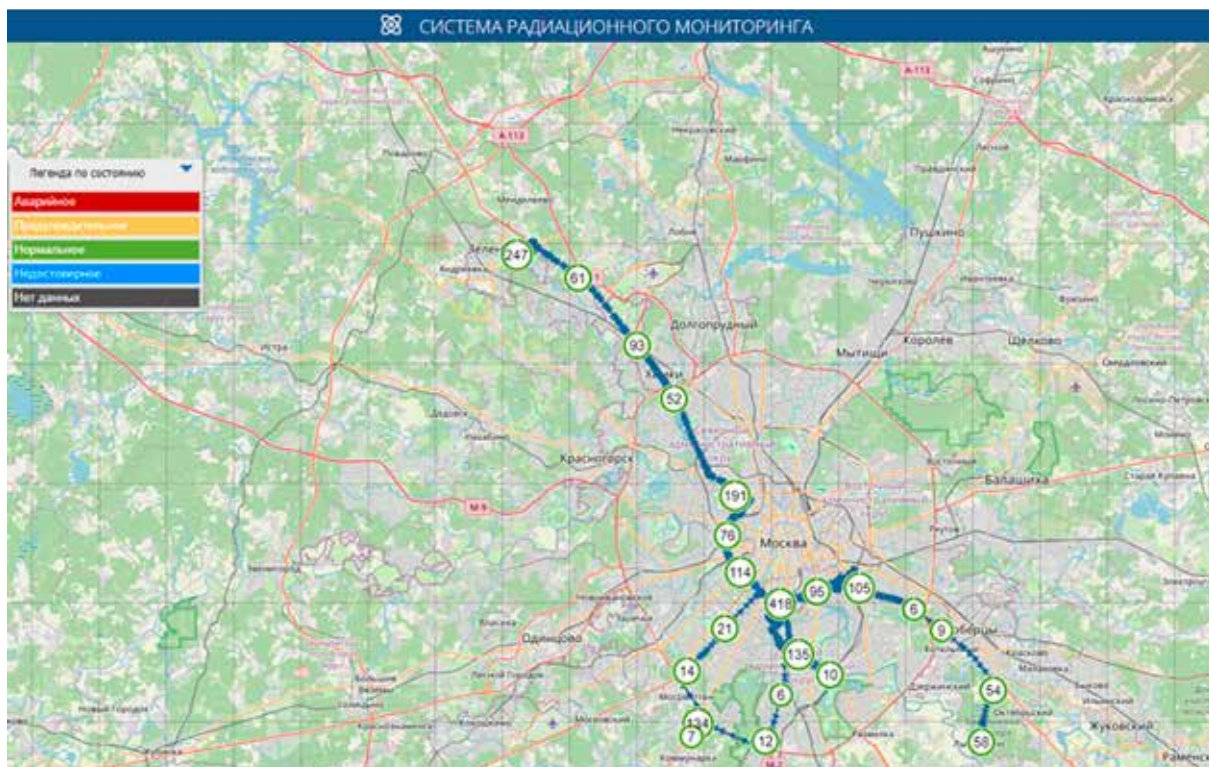


Рис. 2.3.7 – Программное обеспечение представления данных измерений МРКА-ИП

- проектировании, разработке и внедрении информационных систем для задач аварийной готовности и реагирования на ЧС с радиационным фактором,
- создании систем радиационного контроля на ОИАЭ.

Все работы при этом проводились с применением кроссплатформенного специального ПО собственной разработки, использованием свободно распространяемого и широко используемого программного обеспечения с открытыми исходными кодами, переходом к облачным технологиям, использованием современных архитектурных решений, в соответствии с рекомендациями Госкорпорации «Росатом» в области создания IT-решений.

Все расчёты с анализом неопределённостей выполнены на высокопроизводительной кластерной установке ИБРАЭ РАН.

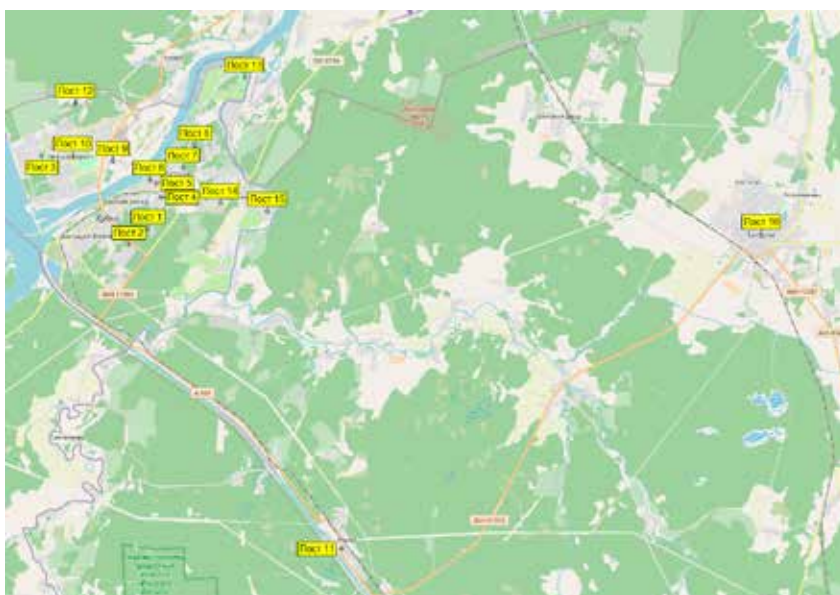


Рис. 2.3.8 – АСКРО ОИАЭ



Рис. 2.3.9 – Работа в АТЦ ОИАЭ во время учений

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
- 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 (dan@ibrae.ac.ru) — заместитель заведующего отделом;

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

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

А. А. Канаев, к.ф.-м.н. (kanaev@ibrae.ac.ru) — зав. лабораторией математических алгоритмов и суперкомпьютерных технологий моделирования многофазных многокомпонентных турбулентных течений;

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

В. Ю. Глотов, к.ф.-м.н., с.н.с. (glotov-v@yandex.ru) — моделирование процессов турбулентного переноса и перемешивания;

В. Г. Кондаков, к.ф.-м.н., с.н.с. (kondakov@ibrae.ac.ru) — математическое моделирование стратифицированных течений со свободной поверхностью;

А. И. Гавриков, к.ф.-м.н., с.н.с. (gavrikovandrey@yandex.ru) — проведение математических расчетов по тематике водородной безопасности;

Д. Г. Асфандияров, к.ф.-м.н., с.н.с. (dasfandiyarov@ibrae.ac.ru) — математическое моделирование течений в водных объектах.

ОСНОВНЫЕ ИТОГИ 2022 ГОДА

1. Обеспечение водородной взрывобезопасности

1. Разработана гидродинамическая (CFD) модель пассивного каталитического рекомбинатора водорода (ПКРВ), позволяющая выполнять прецизионные расчёты гидродинамических течений в условиях работы ПКРВ для задач обоснования безопасности АЭС в ходе тяжёлых аварий с помощью **ПрЭВМ CABARET-SC1** (рис. 2.4.1). Течение газа через ПКРВ вычисляется как естественная конвекция через каталитический блок, моделируемый в приближении пористой среды с заданным гидравлическим сопротивлением [1]. Для уточнения гидравлических потерь в каталитическом блоке проведены трёхмерные расчёты сопротивления канала, образованного каталитическими стержнями. Для производительности ПКРВ использовались две модели: (1) — эмпирическая, на основе зависимости для производительности рекомбинаторов; (2) — диффузионная, в которой предполагается, что скорость химических реакций на поверхности катализатора значительно превышает скорость диффузии компонент смеси из объёма к катализатору, и для вычисления диффузионного потока используется математическая аналогия между процессами тепло- и массообмена. Разработанная модель была использована для расчётной поддержки экспериментов по исследованию работы ПКРВ РВК-500, проводившихся в РФЯЦ ВНИИТФ на крупномасштабной установке БМ-П в 2022 г.

2. Проведён расчётный анализ эксперимента, направленного на **изучение истечения водорода в помещении с естественной вентиляцией**, проведённом Swain и др. [2]. Истечение водорода в эксперименте происходило из пола в левом конце помещения. В правом конце помещения для естественной вентиляции располагались два прямоугольных отверстия — одно на крыше и одно внизу на стене. Для измерения локальной объёмной концентрации водорода в ходе эксперимента использовались четыре датчика (рис. 2.4.2).

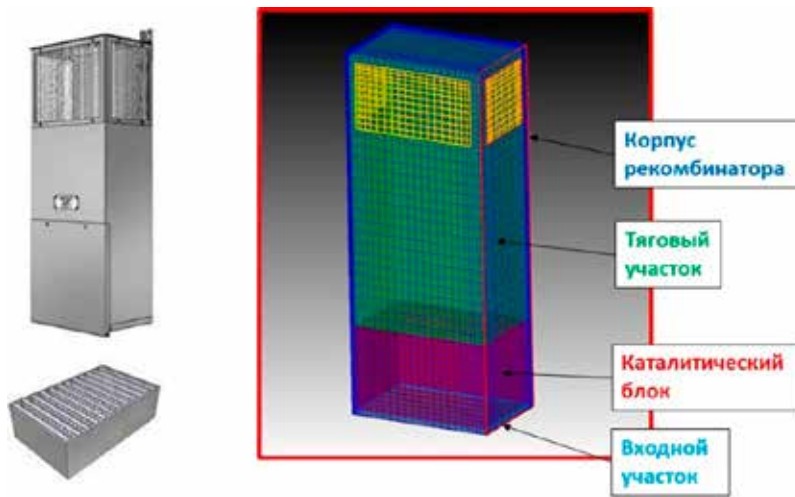


Рис. 2.4.1 – Схема ПКРВ (слева) и модель ПКРВ (справа)

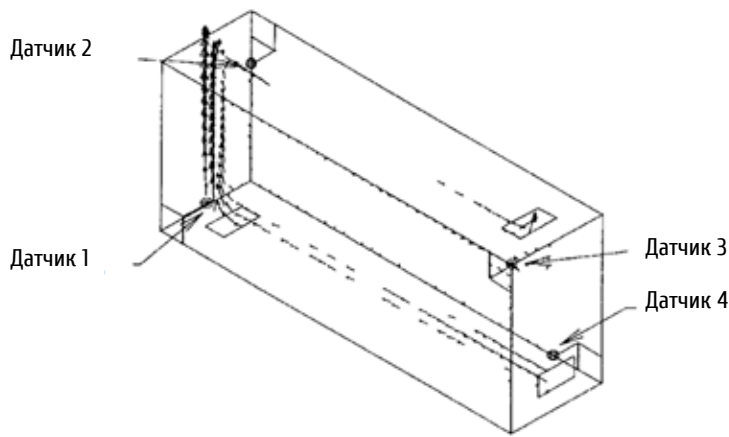


Рис. 2.4.2 – Схема помещения и местоположение четырех датчиков концентрации

Расчёты проводились на двух структурированных сетках с шагом 25.4 мм и 12.7 мм. Количество расчётных ячеек составляло **5 млн. ячеек** для подробной сетки и **620 тыс. ячеек** для грубой сетки.

На рисунке 2.4.3 представлено сравнение результатов расчётов по методике КАБАРЕ для двух сеток с экспериментальными данными. Показано, что недостаточное разрешение турбулентных вихрей на грубой сетке приводит к занижению концентрации водорода на верхних датчиках.

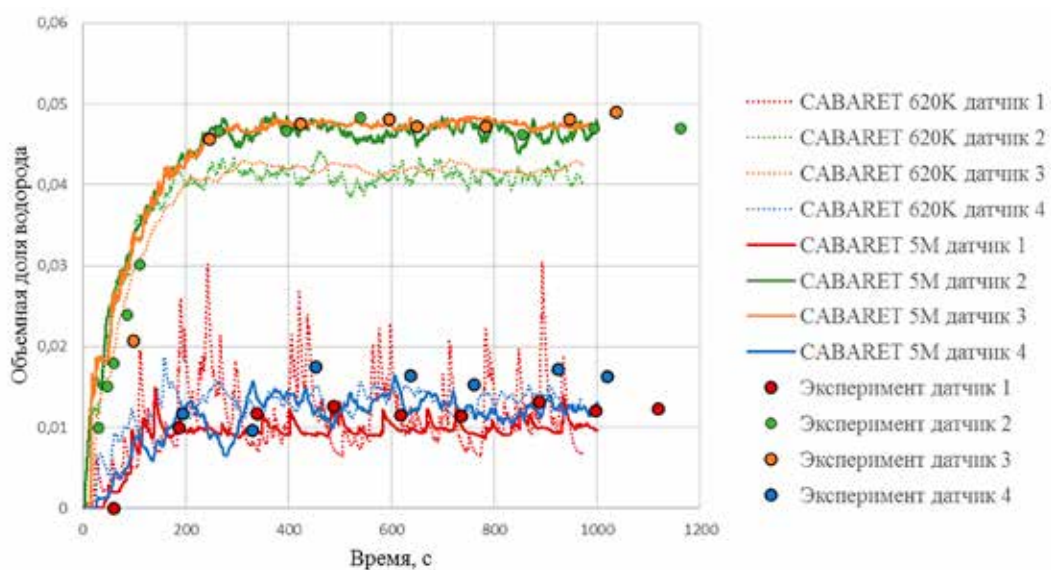


Рис. 2.4.3 – Сравнение результатов расчетов по методике КАБАРЕ для двух сеток с экспериментальными данными

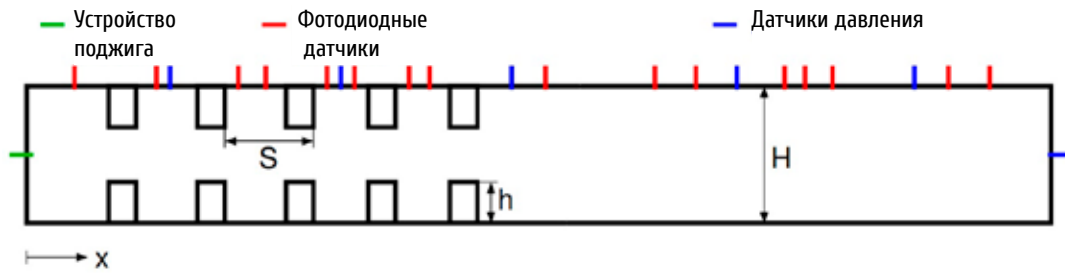


Рис. 2.4.4. – Схема расположения препятствий в установке

3. Проведён расчёт эксперимента с горением стратифицированной водородно-воздушной смеси на установке [3], представляющей собой плоский длинный канал с препятствиями. Препятствия создают уровень загромождённости разгонной части установки $BR=0,3$. Схема расположения препятствий представлена на рис. 2.4.4.

В данном эксперименте установка заполнена водородно-воздушной смесью с положительным градиентом распределения водорода (рис. 2.4.5). По другим направлениям смесь считается однородной.

На рис.2.4.6(а) и рис.2.4.6(б) сопоставлены положение фронта пламени и динамика скорости фронта пламени вдоль длины экспериментальной установки для расчётов и эксперимента соответственно. Рисунки показывают хорошее воспроизведение экспериментальных данных в расчёте.

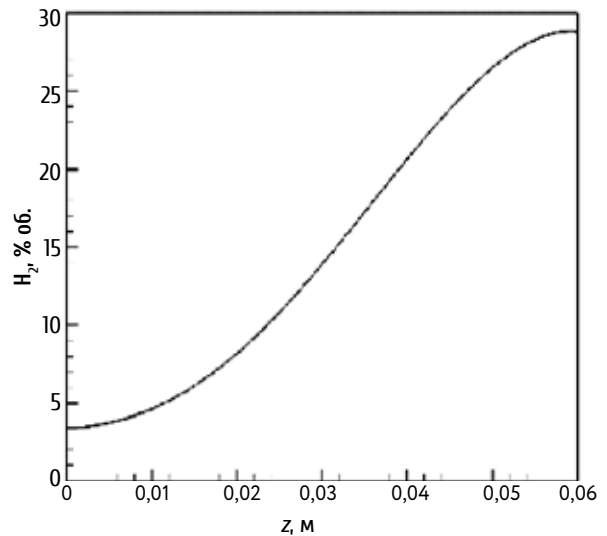


Рис. 2.4.5. – Зависимость начальной концентрации водорода от высоты установки

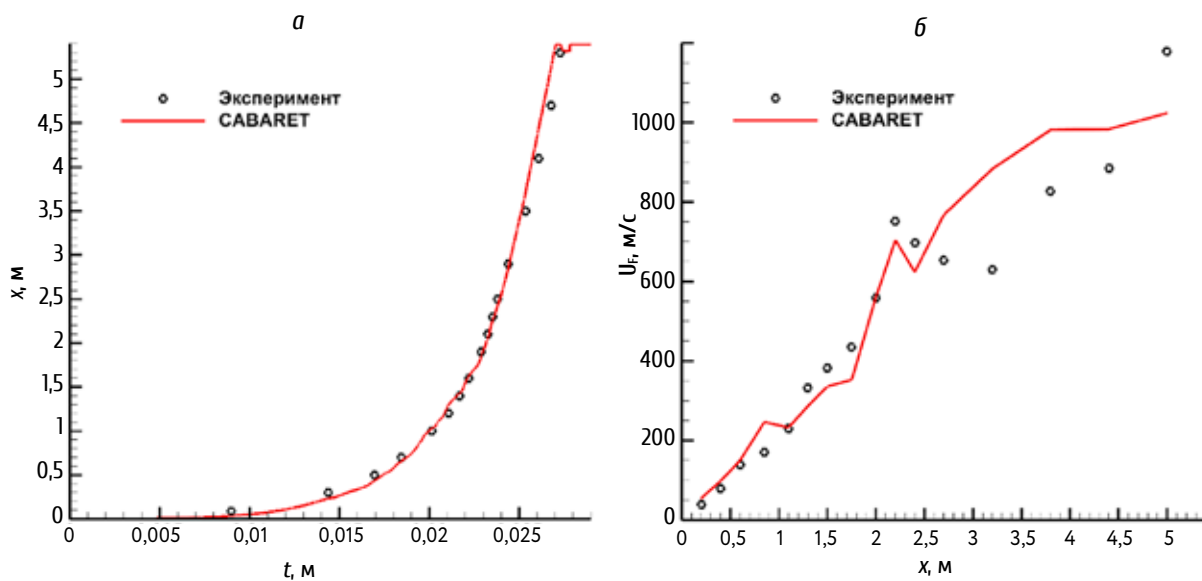


Рис. 2.4.6. – Положение фронта пламени в расчёте и эксперименте – (а), динамика скорости фронта пламени в расчёте и эксперименте – (б).

2. Моделирование стратифицированных течений со свободной поверхностью

Предложена [4] конечно-разностная схема решения двумерного уравнения движения вязкой морской воды, стратифицированной по солёности. Модель свободной поверхности предполагается решать с помощью подхода «мелкой воды», а сшивку решения производить за счёт задания давления на верхней границе с нулевым потоком в вертикальном направлении, из предположения, что горизонтальные потоки преобладают над вертикальным потоком. При таком подходе важно правильно выбрать начальное разделение толщи морской воды на две области решения, чтобы амплитуда волн верхнего слоя не «залезала» в нижнюю расчётную область.

Предложенная модель стратифицированной морской среды реализована с помощью решения уравнения непрерывности (бездивергентное поле скорости). Решение модифицированного уравнения Пуассона на «избыточное давление», учитывающее неоднородность плотности, производится методом параллельных сопряжённых градиентов с преобуславливателем в виде обычного оператора Лапласа с постоянной плотностью. Прямой решатель для обращения оператора Лапласа получается путем использования преобразований Фурье неизвестных переменных давления в двукратное разложение (давление – дискретный ряд Фурье) и приравнивания соответствующей компоненты правого разложения (коэффициенту Фурье правой части – дивергенции скорости).

Дальнейшее развитие по данному направлению:

- Предполагается использовать разработанную модель в задачах оперативной океанологии для Северного морского пути с учётом приливных течений, которые достигают в этом регионе порядка шести метров.
- Оценка сверху указывает на необходимость строить сетку размером порядка **25 млн. ячеек**. При этом для жидкой части получим максимальный размер сетки, составляющий **5—6 млн. ячеек**. Для эффективного решения задач течения в морских водах понадобится использовать параллельные алгоритмы с декартовой декомпозицией области в планарном направлении.
- Для реализации модели требуется решение трёхмерной системы уравнений Навье-Стокса с добавлением уравнения адвекции-диффузии соли в морской среде с помощью методики **КАБАРЕ**. Также потребуется решать уравнение Пуассона на «избыточное давление» в случае наличия неоднородной границы на нижней придонной части сеточной области.

3. Разработка программных средств для моделирования аварийного переноса радионуклидов в водных средах

В 2022 году продолжались изучение и разработка методов моделирования гидродинамических режимов течений вблизи Мурманска в Кольском залива и вблизи порта Певек (ключевой порт на Северном морском пути) с учётом реальных глубин и береговой линии. Работы были посвящены актуальной задаче по моделированию режимов циркуляции российских северных вод Кольского залива, где расположены многие потенциально радиационно опасные объекты, а также пролива Певек на северо-востоке России, где расположена плавучая атомная теплоэлектростанция «Академик Ломоносов».

В связи с многоплановостью задач и стратегической важностью этих водных акваторий желательно иметь инструментарий для моделирования режимов циркуляции в зависимости от разных факторов, таких как приливы и отливы, ветровые нагонные волны, с учётом реальной трёхмерной геометрии водной акватории, береговой линии, рельефа окружающей местности. Это осуществляется нами на основе моделирования гидродинамических режимов циркуляции совместно с 3D моделированием распространения загрязнения в акватории.

Для крупных акваторий такие работы ведутся широко и интенсивно, что же касается северных заливов, то получение серьёзных результатов, приближенных к реальности, затруднено постановкой граничных условий для открытых акваторий.

В целом пролив Певек неглубокий, с большой горизонтальной протяженностью. Средняя глубина его не более 15—20 м. На основании этого, приемлемо использовать для моделирования гидродинамики приближение Сен-Венана (уравнения мелкой воды над неровным дном по международной классификации). Это гиперболическая система уравнений, для решения которой имеются несколько иностранных программных пакетов, а также довольно много авторских разработок. Однако, судя по отзывам, в частности, на самые известные коммерческие разработки, типовые проблемы, возникающие при решении таких систем, полностью не устранены.

Возможность использования приближения мелкой воды для Кольского залива требует изучения и подтверждения.



Рис. 2.4.7 – Референсные точки для определения значений зональной и меридиональной компоненты скорости на границе области

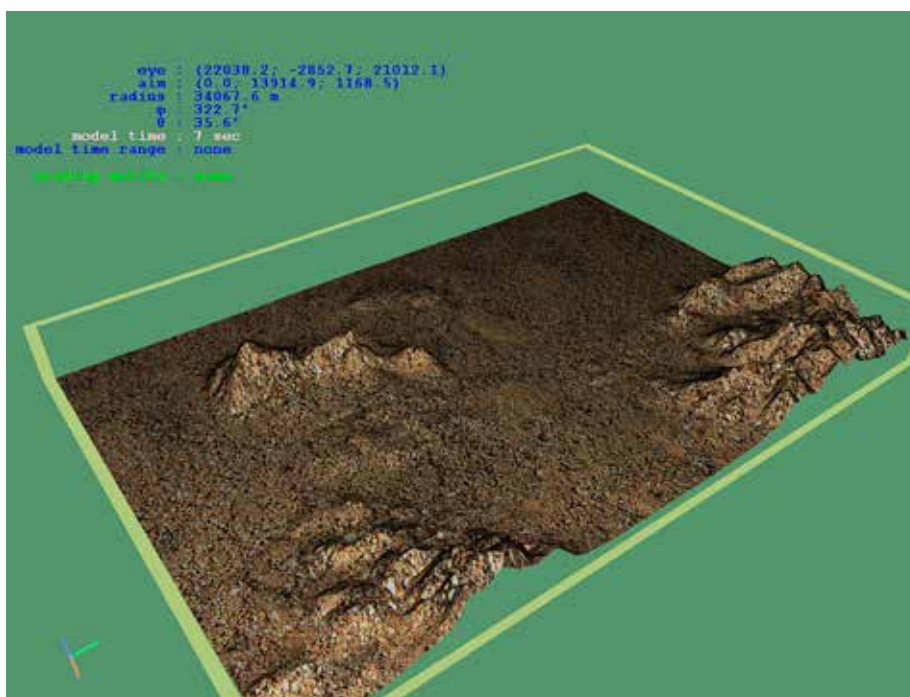


Рис. 2.4.8 – Пример визуализации дна и окружающего рельефа в трёхмерной модели пролива Певек

Ранее в отделе были разработаны высокоточные надёжные численные методы решения уравнений Сен-Венана. По сравнению с этими стандартными версиями, в 2022 году реализован дополнительный параметрический учёт стрессового ветрового напряжения, трения потока о дно, взаимодействия с сухой поверхностью берега. В последнем случае приближение Сен-Венана теряет смысл.

Для построения 3D-модели Кольского залива использовались две базы данных по рельефу — орография **ASTERGDEM** (ASTER global digital elevation map) и батиметрия **GEBCO**.

На верхней открытой границе расчётной области задаются постоянные значения скорости течения. На этих границах постоянные значения глубины и скорости определяют постоянный расход в данных ячейках. На правой и левой границах задаются условия свободного вытекания. При этом данные по скоростям течения в среднем колене Кольского залива, полученные в ходе расчёта, согласуются со средними значениями скорости течения внутренних вод в данной области (0.25—0.75 м/с). Для северной части Кольского залива используются значения, полученные из базы данных по среднемесячным скоростям (данные реанализа) SODA_3.12.2. В качестве референсных берутся значения в следующих точках (рис.2.4.7):

- 1) 33.5° в.д., 69.5° с.ш.,
- 2) 34° в.д., 69.5° с.ш.

Для построения трёхмерной модели пролива Певек использовались те же базы данных, что и для Кольского залива. Визуализация дна и окружающего рельефа представлена на рис.2.4.8.

На рис.2.4.9 представлена географическая карта пролива Певек с островами и его трёхмерная математическая модель с линиями уровня по глубинам и высотам.



Рис 2.4.9 – Карта пролива Певек и его 3D-модель

4. Разработка программного обеспечения для задач оперативной океанологии

Задачи оперативной океанологии характеризуются требованием проведения расчётов в сжатое время. Для этого используются различные подходы — распараллеливание кода для многопроцессорного кластера, упрощение вычислительной модели, применение специальных алгоритмов, позволяющих увеличить скорость расчёта за счёт уменьшения точности и другие. Одним из возможных подходов является применение прямоугольных расчётных сеток, что значительно уменьшает вычислительную нагрузку. Однако использование регулярных прямоугольных сеток не позволяет эффективно производить их сгущение в локальных зонах — около границ или в областях с резко меняющимися параметрами.

В ИБРАЭ РАН была разработана методика построения и использования двумерных квадратов с возможностью локального сгущения в нужных областях. Такие сетки использовались для решения системы уравнений Сен-Венана, являющейся упрощением системы уравнений Навье-Стокса.

В отчётный период была разработана [методика для решения трёхмерных задач вычислительной океанологии](#).

Для этого, во-первых, разработанные ранее двумерные алгоритмы построения квадратов были обобщены на трёхмерный случай. Трёхмерные октосетки строятся на основе базовой регулярной трёхмерной прямоугольной сетки, охватывающей расчётную область. Преобразование базовой сетки в требуемую октосетку производится с помощью рекурсивного применения двух операций — дробления одной ячейки на восемь и исключения ячейки из сетки. Для описания этого процесса разработан язык инструкций, каждая из которых содержит предикат (условие выполнения операции над ячейкой) и описание действия. Получающаяся в результате октосетка хранится в структуре, оптимальной для использования в расчётных алгоритмах (рис. 2.4.10). Для октосеток разработаны алгоритмы разбиения на партиции и алгоритм загрузки партиций на многопроцессорный кластер.

Для решения системы уравнений гидродинамики в трёхмерной области была разработана и протестирована конечно-объёмная разностная схема. Схема относится к классу схем КАБАРЕ, является консервативной, обладает вторым порядком аппроксимации по пространству и времени. Отличительными особенностями данной схемы являются наличие свободной верхней поверхности и использование октосетки. Для вычисления потоковых

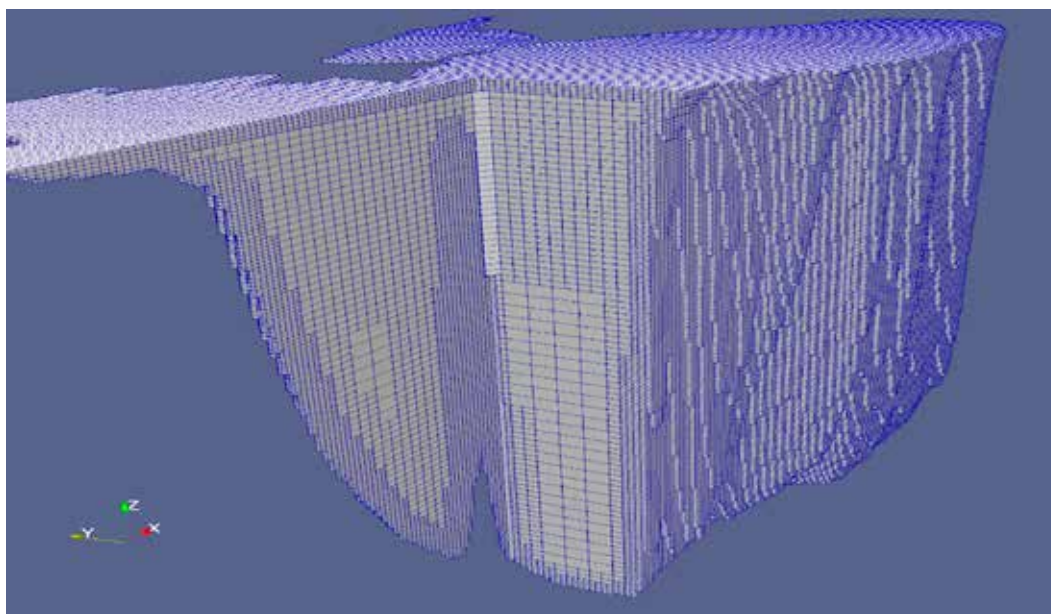


Рис 2.4.10 — Пример построения октосетки для акватории Чёрного моря

величин на гранях применяется характеристический подход, для вычисления консервативных параметров в ячейках — балансный. Особо рассмотрен алгоритм определения потоков на гранях, на которых происходит контакт разных уровней разбиения ячеек октосетки. Верификация проводилась на лабораторных экспериментах. Получено как качественное, так и количественное совпадение результатов. Проведены расчёты течений в Чёрном море (рис. 2.4.12). Показано качественное совпадение с расчётами других авторов.

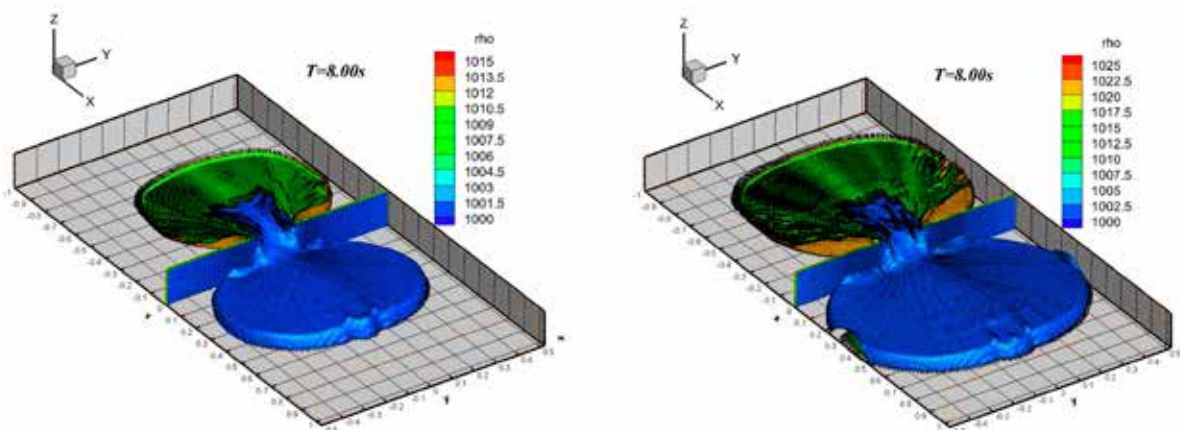


Рис 2.4.11 – Моделирование перелива жидкости через щель в перегородке

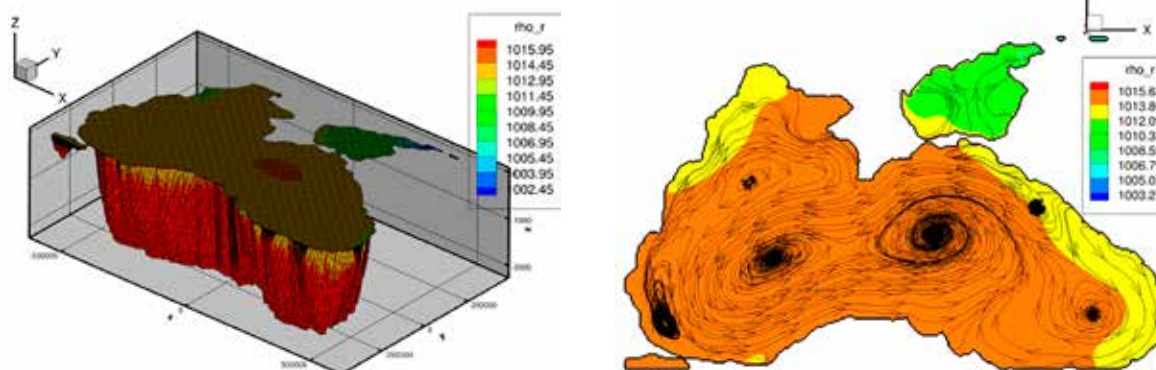


Рис 2.4.12 – Пример моделирования течений в Чёрном море

5. Проведение прецизионных нейтронно-физических расчетов

В последние годы нуклиды с малыми концентрациями — примесные нуклиды — всё более востребованы в задачах радиохимии, при уточнении нейтронно-физических характеристик различных сред, например, теплоносителя с радионуклидами, попавшими в него из негерметичных твэлов. Использование в прецизионных расчётах примесных нуклидов обуславливает повышение точности их вычисления в задачах нуклидной кинетики. Предложено решение задач активации по программе MZK на максимально полной базе ядерно-физических данных с использованием расширенных библиотек, включающих высокопороговые реакции (n, nt) , $(n, 2\alpha)$, $(n, 2p)$, $(n, p\alpha)$, (n, nd) , (n, np) , $(n, 2n\alpha)$ и др. Прецизионная программа MZK, разработанная совместно со специалистами МГТУ им. Н.Э. Баумана, обеспечивает гарантированную точность всех вычисляемых нуклидов, включая примесные, при облучении от секунд до тысячи суток.

Рассмотрена методика вычисления одногрупповых сечений высокопороговых реакций применительно к спектру в быстрых реакторах. Результаты расчётов позволили выявить влияние расширенных библиотек на нуклидный состав облучаемых композиций <Ca-Sc>, <Ru-Rh>, <Ce-Gd>, <Nd-W> в зависимости от заряда ядра нуклидов и подтвердить важность включения высокопороговых реакций в библиотеки одногрупповых сечений в расчетах нуклидного состава облучаемой стали ЧС-68 и ЭК-181.

Прецизионные расчеты по программе MZK с расширенными библиотеками могут использоваться в бенчмарк-расчетах и практических задачах для уточнения нуклидного состава различных композиций с любым временем облучения.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Моделирование работы пассивного автокаталитического рекомбинатора в вихреразрешающем приближении // А. А. Канаев, В. Ю. Глотов, А. Е. Киселев. Известия РАН. Энергетика, 2022, — № 4, С. 43–59.
2. Experimental verification of a hydrogen risk assessment method. Michael R. Swain, Eric S. Grilliot, and Matthew N. Swain // Chemical Health & Safety 1999, 6 (3), 28–32, DOI: 10.1016/S1074-9098(00)80037-4.
3. Ettner, F. Effiziente numerische Simulation des Deflagrations-Defonations-Übergangs.// PhD thesis. Munich. 2013.

КЛЮЧЕВЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАБОТ

1. А. А. Канаев, В.Ю. Глотов, А.Е. Киселев. Моделирование работы пассивного автокаталитического рекомбинатора в вихреразрешающем приближении // Известия РАН. Энергетика, 2022, — № 4, — С. 43–59.
2. А. И. Гавриков, А.В. Данилин, А.А. Канаев, А.Е. Киселев. Моделирование детонации в установках крупного масштаба с помощью прецизионного вихреразрешающего кода CABARET-COMBUSTION // Известия РАН. Энергетика, 2022, — № 4, — С. 11–24.
3. В. Ю. Глотов, А.А. Канаев, А.В. Данилин, В.Г. Кондаков. Моделирование водородной пожар-струи с помощью методики КАБАРЕ // Известия РАН. Энергетика, 2022, — № 4, — С. 25–42.
4. Gushchin, V. A., Kondakov, V.G. (2022). One Solution of Task with Internal Flow in Non-uniform Fluid Using CABARET Method. // In: Lirkov, I., Margenov, S. (eds) Large-Scale Scientific Computing. // LSSC 2021. Lecture Notes in Computer Science, vol 13127. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-97549-4_13.
5. V. M. Goloviznin, P. A. Maiorov, P. A. Maiorov, A. V. Solovjev, Validation of the low dissipation computational algorithm Cabaret-mfsh for multilayer hydrostatic flows with a free surface on the lock-release experiments // Journal of Computational Physics, Vol. 463. — P. 111239, 2022.
6. Goloviznin, V. M., Solovjev, A. V., Dissipative and Dispersive Properties of Finite Difference Schemes for the Linear Transport Equation on A 4x3 Metatemplate // Mathematical Models and Computer Simulation this link is disabled, 2022, 14(1), pp. 28–37.
7. Бибердорф Э.А., Митенкова Е.Ф., Семенова Т.В., Соловьева Е.В. Метод ассоциированных инвариантных подпространств в задачах распределения нейтронов в слабосвязных системах // ВАНТ, Сер. Математическое моделирование физических процессов, 2022, — вып. 2, — С. 3–16.



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)

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

- 1 НЕКЛАССИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПЕРЕНОСА ПРИМЕСИ В СИЛЬНО НЕОДНОРОДНЫХ СРЕДАХ, ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ПРОБЛЕМЕ ЗАХОРОНЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ В ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДАХ
- 2 МОДЕЛИ СОПРЯЖЁННЫХ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА, ГИДРОДИНАМИКИ И ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ ДЛЯ ПРОБЛЕМЫ ИЗОЛЯЦИИ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ МЕТОДОМ САМОПОГРУЖЕНИЯ
- 3 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И РАСЧЁТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОКИСЛЕНИЯ БЕРИЛЛИЕВОЙ ПЫЛИ В ВАКУУМНОЙ КАМЕРЕ ТЕРМОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА ИТЭР ПРИ АВАРИЯХ, СВЯЗАННЫХ С ПОСТУПЛЕНИЕМ ВОДЫ ИЗ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ПЕРВОЙ СТЕНКИ ИЛИ ДИВЕРТОРА В ВАКУУМНУЮ КАМЕРУ (АВАРИИ ТИПА LOCA)
- 4 РАЗРАБОТКА УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫХ 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

КЛЮЧЕВЫЕ СПЕЦИАЛИСТЫ

Аветисян А.Р., к.ф.-м.н. (avetis@ibrae.ac.ru) — вычислительная гидродинамика;

Буринский А.Я., д.ф.-м.н. (bur@ibrae.ac.ru) — гравитация и физика элементарных частиц;

Васильев А.Д., к.ф.-м.н. (vasil@ibrae.ac.ru) — теоретическая и вычислительная физика в приложении к: неклассическим процессам переноса примесей в неоднородных средах; вопросам безопасности термоядерных реакторов, включая окисление металлических поверхностей вакуумной камеры при авариях; закономерностям высокотемпературного окисления ATF-оболочек ядерных реакторов, включая циркониевые оболочки с хромовым напылением;

Обухов Ю.Н., 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;

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

ОСНОВНЫЕ ИТОГИ 2022 ГОДА

1. Неклассические процессы переноса

Разработана не содержащая ограничительных условий асимптотическая теория переноса примеси посредством адвекции-диффузии в среде с крупномасштабными неоднородностями. Путем применения ранее предложенного в лаборатории асимптотического подхода задача сведена к уравнению в частных производных первого порядка. Это позволило на основе действующего в таких случаях канонического формализма (формализм Гамильтона — Якоби в классической механике) концентрацию примеси, испытывающей адвекцию-диффузию в неоднородной среде, представить в квадратурах — через интегралы вдоль линии, условно названной траекторией квазилуча. Эта последняя определяется из вариационного принципа, который является аналогом принципа Ферма в геометрической оптике, или Мопертюи в классической механике.

По сравнению с прямыми численными расчётами на основе уравнения в частных производных второго порядка, в расчётах переноса примеси в неоднородной среде, базирующихся на асимптотической теории, наряду с их простотой ожидается значительная экономия расчётного времени. Полученные результаты важны для проблемы безопасного захоронения радиоактивных отходов в геологических структурах.

Проведённое исследование представляет собой дальнейшее развитие асимптотического подхода к описанию процессов переноса в неоднородных средах, инициированного в Лаборатории теоретической физики ИБРАЭ РАН. В 2023 году планируется распространить этот подход на случай [двупористых геологических сред](#).

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

Для описания эволюции жидких включений в галитах разработаны два модуля программ, реализующих соответствующие два типа моделей:

- в простейшем приближении для ансамбля включений было получено уравнение типа Больцмана для функции распределения в зависимости от изотермического размера включения с учётом коалесценции и мгновенного равновероятностного распада;

- модель эволюции единичного жидкого включения в галитах в поле градиента температуры с учётом поверхностных явлений.

Для численной реализации математической модели уравнение диффузии с начальными и граничными условиями аппроксимировалось методом конечных элементов на треугольных неструктурированных подвижных сетках.

Разработан соответствующий программный комплекс на базе открытой инструментальной среды **FEniCS**. Проведены расчёты, моделирующие эксперимент, описанный в литературе. Сравнение результатов расчётов с экспериментальными данными показало их хорошее совпадение.

Проведено сравнение результатов расчёта скорости самопогружения тепловыделяющего шара в формации галитов с аналогичными результатами для гранитных пород (рис. 2.4.13).

Работы проведены в рамках плана ИБРАЭ РАН по НИР. Основным достижением на 2022 год является модель эволюции единичного жидкого включения в галитах в поле градиента температуры с учётом поверхностных явлений. В дальнейшем предполагается развитие разработанных моделей с учётом влияния межкристаллических границ.

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

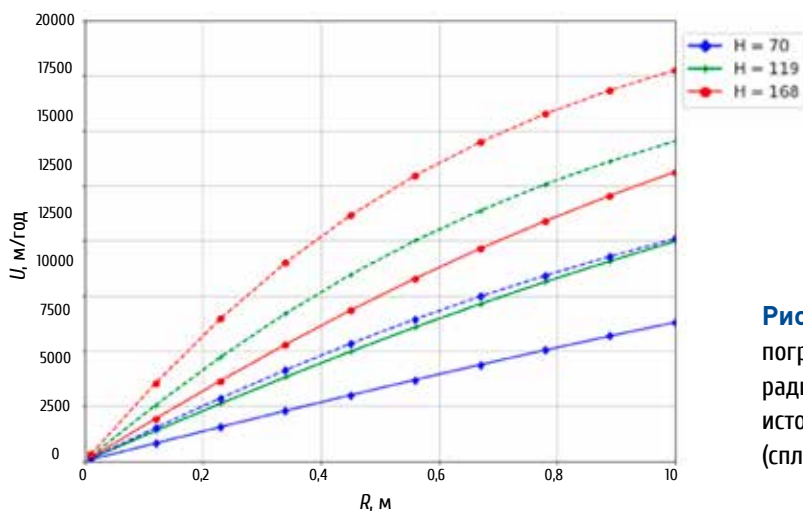


Рис. 2.4.13 – Зависимость скорости погружения тепловыделяющего шара от радиуса для разных значений мощности источника тепловыделения для гранита (сплошная линия) и для соли (пунктирная)

3. Численные модели генерации водорода при окислении бериллиевой пыли и бериллиевых панелей в ходе аварии LOCA термоядерного реактора ITER

Созданы численные модели для оценки скорости окисления слоёв бериллиевой пыли, которая будет образовываться и накапливаться при работе термоядерного реактора ИТЭР (геометрия 1), а также скорости окисления твёрдых бериллиевых пластин (геометрия 2). Окисление может происходить при взаимодействии бериллия с паром в результате аварийного прорыва воды из системы охлаждения в вакуумную камеру (ВК) при аварии типа LOCA и сопровождаться выделением водорода, что создаёт опасность горения и взрыва.

Модель окисления пылевого слоя основана на предположении, что при высоких температурах пыли скорость окисления ограничивается скоростью притока в зону реакции окислителя (пара) путём диффузии в пористой среде пылевого слоя. Представленная модель позволяет определить скорость наработки и количество водорода при заданной интенсивности истечения воды в ВК и, следовательно, концентрации пара в ВК, которая является входным параметром для модели.

На рис. 2.4.14 показан профиль концентрации водяного пара, нормированной на концентрацию пара на левой границе зоны окисления C_{bv} (соответствующей координате $x=0$),

вглубь слоя пыли толщиной $\Delta = 2$ мм в зависимости от температуры, справедливый для малой толщины окисленного слоя $X \ll \Delta$.

Проведена численная оценка скорости и времени полного окисления пыли в слое в предположении о том, что гидродинамические условия на границе слоя неизменны и соответствуют процессу заполнения камеры при площади сечения разрыва $S=0,01$ м². Полученное таким образом время окисления оказывается значительно больше времени заполнения вакуумной камеры. При рассмотренных здесь параметрах пылевого слоя (толщина 2 мм, плотность 1 г/см³) его полное окисление будет сопровождаться выделением около 450 г водорода с 1 м² со скоростью $\sim 1\div 2$ г/(м²·с) при температуре в зоне горения 1200÷1400К (рис. 2.4.15).

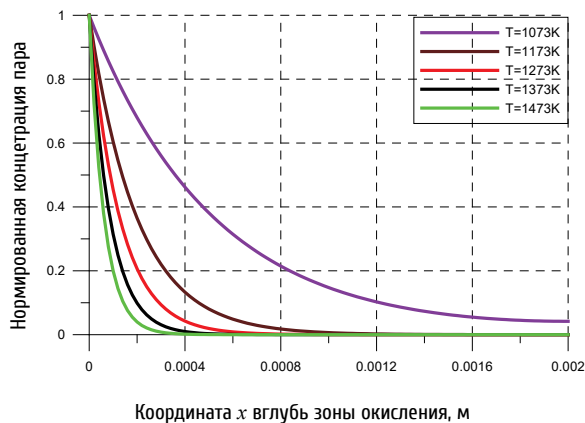


Рис. 2.4.14 – Профиль концентрации водяного пара в зоне реакции в слое металлической пыли Be

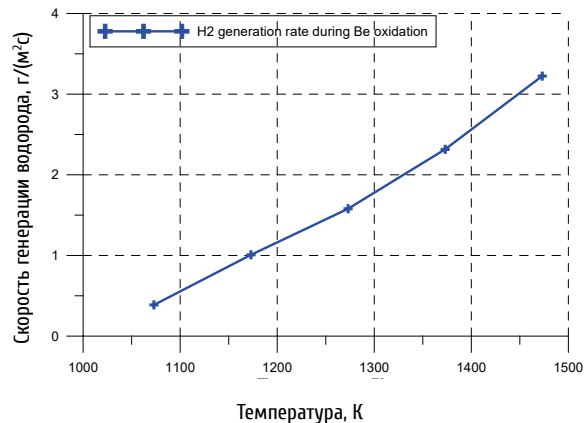


Рис. 2.4.15 – Зависимость скорости генерации водорода с единицы площади пылевого слоя от температуры

4. Усовершенствованная модель окисления ATF-оболочки из циркония с хромовым напылением

Разработана усовершенствованная модель окисления перспективных ATF-оболочек для ядерных реакторов на основе циркония с хромовым покрытием толщиной до 15—20 мкм. Анализ экспериментальных и аналитических результатов позволяет утверждать, что оболочки на основе Zr с хромовым покрытием обладают низкой кинетикой окисления в диапазоне температур $T=700\text{—}1300^\circ\text{C}$. Однако во время высокотемпературного окисления постепенно развиваются три последовательные фазы этого процесса, которые приводят к значительному ухудшению защитных характеристик оболочки (рис. 2.4.16).

Например, атомы Zr диффундируют в металлическое хромовое покрытие (рис. 2.4.16) и образуют преципитаты ZrO_2 после их окисления. Это приводит к повышению эффективного коэффициента диффузии кислорода в слое хрома, поскольку диффузия намного сильнее вдоль границ зёрен ZrO_2 , чем в чистом Zr. Кроме того, атомы Cr из оксида Cr_2O_3 заменяются атомами Zr, что приводит к окислительно-восстановительной реакции $3\text{Zr} + 2\text{Cr}_2\text{O}_3 = 3\text{ZrO}_2 + 4\text{Cr}$. Таким образом, защитный слой оксида хрома после роста в начале окисления становится в дальнейшем тоньше (рис. 2.4.17).

Новая усовершенствованная аналитическая и численная модель окисления ATF-оболочек Zr/Cr основана на решении уравнений диффузии кислорода с одновременным решением уравнений диффузии 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. 2.4.17), учитывая сложность протекающих процессов.

Несмотря на эти результаты, 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 в ходе смягчения

последствий запроектных аварий на АЭС. Наибольший выигрыш от использования циркониевых оболочек с хромовым напылением ожидается для сценариев с диапазоном температур около 700—1200°C в рамках проектных аварий, соответственно при этом ожидается низкая скорость генерации водорода.

Исследования по теме безопасности термоядерных реакторов ведутся в ИБРАЭ с 2021 года. Принципиально новым организационным моментом в 2022 году стала высокая степень взаимодействия с другими участниками исследований, обусловленная наличием очень широкого спектра различных взаимозависящих друг от друга физико-химических процессов для изучаемых объектов.

В 2023 году планируется завершить аналитические и численные исследования по окислению бериллиевых и вольфрамовых твердых поверхностей в ходе аварии на термоядерном реакторе ИТЕР, начать построение моделей поведения (левитация, окисление, взрыв) взвешенной бериллиевой пыли. Планируется создать усовершенствованный численный код для расчёта поведения ATF-оболочек Zr/Cr.

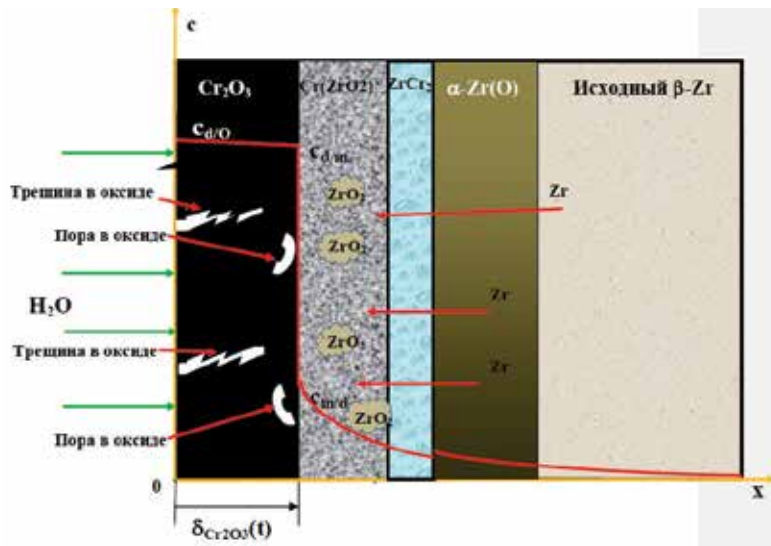


Рис. 2.4.16 – Профиль концентрации кислорода в ходе фазы II постепенного ухудшения защитных свойств хромового покрытия ATF-оболочки из Zr/Cr.

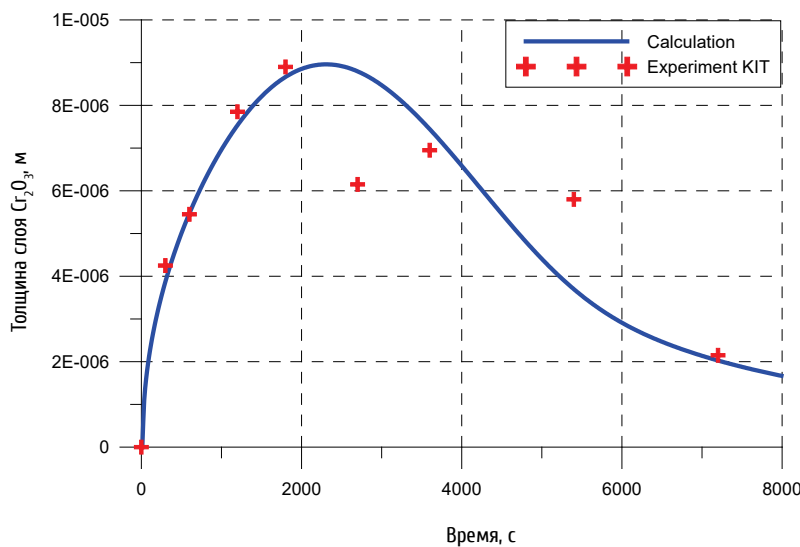


Рис. 2.4.17 – Сравнение расчётных результатов для толщины оксида хрома при окислении ATF-оболочки Zr/Cr при температуре $T=1200$ С с экспериментальными результатами из работы:

J. Liu, U. Stegmaier, C. Tang, M. Steinbrueck, M. Grosse, "The coating degradation mechanism during the isothermal steam oxidation of Cr-coated Zry-4 at 1200 C" // Proc. 26th International QUENCH Workshop (QUENCH-26), Karlsruhe, Germany, December 6-10

5. Квантовая и классическая динамика физических систем со спином и дипольными моментами, в том числе систем многих частиц и сплошных сред

Изучение динамики спина для частиц, протяжённых тел, сплошных сред во внешних физических полях для взаимодействий общего вида в произвольном пространстве-времени представляет собой фундаментальную проблему теоретической физики. На предыдущих этапах данной научно-исследовательской работы было впервые произведено полное релятивистское квантово-механическое описание динамики частиц с внутренними степенями свободы в произвольных внешних полях, что принципиально важно как для теории, так и эксперимента. Полученные результаты вносят системный вклад в развитие физики спина и теории гравитации. В рамках отчётного этапа исследований решались несколько задач, которые, с одной стороны, развивали методы и дополняли результаты, полученные на более ранних этапах; с другой стороны, они являлись переходом к дальнейшему решению задач, связанных с разработкой новых физических моделей и устройств на базе динамики спина применительно к прецизионным экспериментам в физике частиц, важных для развития новых методов, комплексов физических и математических моделей для решения проблем безопасного использования атомной и термоядерной энергии, инновационных ядерных энерготехнологий и ядерного топливного цикла.

- Построен формализм квантовой гидродинамики для многочастичной системы массивных дираковских фермионных частиц со спином $1/2$, взаимодействующих с внешними электромагнитными, гравитационными и инерциальными полями. Это существенно расширяет одночастичный квантовый гидродинамический подход, который был разработан для плоского пространства-времени. Установлена непротиворечивая гидродинамическая формулировка для многочастичной квантовой системы фермионов, которая учитывает тепловые эффекты, возникающие в результате флуктуаций спина и скорости вблизи их средних значений. В качестве приложения формализма дана оценка возможных влияний геометрических и квантовых вкладов на дисперсионные характеристики спиновых волн, возбуждаемых в фермионной системе многих частиц. Разработанная гидродинамическая модель может быть использована в дальнейшем при исследовании различных типов явлений переноса в средах со спином с учётом внешних электромагнитных и гравитационных полей.
- Продолжено исследование динамики нейтронов и спиновых эффектов во внешних полях. Найдено точное решение для нейтрального фермиона в электромагнитном поле плоской волны, которое обобщает решение Волкова на случай неминимальной связи. Новые результаты учитывают как магнитный, так и электрический дипольный моменты. Среди возможных приложений можно отметить ряд физически важных задач, таких как процессы рассеяния и излучения фермионной частицы во внешних волновых конфигурациях, которые представляют интерес как для физики высоких энергий, так и для физики тяжёлых ионов.
- С целью улучшить понимание соответствия динамики классического спина в моделях макроскопической материи и квантовой динамики спина в моделях микроскопической материи, построена лагранжева вариационная теория среды со спином и дипольными моментами, элементы которой взаимодействуют неминимальным образом с внешними электромагнитным и гравитационным полями. Найденные результаты составляют основу для решения проблемы Абрагама-Минковского для импульса фотона в сложных средах с микроструктурой.
- Предложена новая концепция гравитомагнитной спиральности, пригодная для анализа потоков массивных заряженных частиц как в астрофизических ситуациях, так и в условиях ускорителей в физике высоких энергий. Спиральность является важной теоретико-полевой величиной, которая с одной стороны тесно связана со спином, а с другой стороны отражает нетривиальные топологические свойства конфигураций поля. Эта задача решается в рамках теории гравитоэлектромагнетизма, где наиболее ясно видны аналогии между теорией Максвелла электромагнитного поля и общей теорией относительности гравитационного поля. Полученные результаты представляют значительный

интерес для исследования возможных макроскопических проявлений квантовых аномалий в коллективной динамике систем киральных частиц, таких как аномальные явления переноса (киральный магнитный эффект и киральный вихревой эффект), с акцентом на спиновые гравитационные эффекты, индуцированные вкладом Ние-Яна в аномалию аксиального тока.

6. Новый подход к теории элементарных частиц. Развитие непертурбативной модели электрона как черной дыры

Разработанная нами ранее непертурбативная модель электрона взаимодействующего с гравитацией, основанная на сверх-вращающемся решении для черной дыры Керра-Ньюмана, приводила нас к тесной связи этой модели с моделью квантовой электродинамики (КЭД). Развивая эту линию, в 2022 году наше исследование было связано с рассмотрением электрона как составной модели, которая подобно КЭД может рассматриваться в различных аспектах, либо как модель «голового» электрона, либо как модель гравитационно «одетого» электрона.

Было установлено, что модель «голового» электрона может быть реализована в виде модели безмассовой релятивистской струны, которая, являясь точным классическим решением уравнений Эйнштейна-Максвелла, устраняет противоречие между протяжённой частицей теории гравитации и точечным электроном квантовой теории. Безмассовая релятивистская струна приобретает массу за счет вращения со скоростью света, и при этом сокращается преобразованиями Лоренца, превращаясь в квантовый точечный электрон, описываемый волновой функцией в представлении Шредингера. В фиксированный момент мирового времени $t=const$, такая струна описывается решением КН в форме Керра-Шильда, что соответствует вектору состояния в представлении Гейзенберга. Гамильтониан безмассовой струны линеаризуется, и векторы состояния частицы в представлениях Гейзенберга и Шредингера оказываются связанными унитарным преобразованием, приобретающим физический смысл оператора релятивистского вращения волновой функции.

Развитие нового формализма «одетого» электрона включает в рассмотрение отброшенный ранее Израэлем и Лопезом «отрицательный» лист решения Керра-Ньюмана (КН), который в новом рассмотрении преобразуется в «зеркальный» лист и сопоставляется «позитрону», участвующему в формировании взаимодействующего с гравитацией электронно-позитронного вакуума. В регуляризованной модели «одетого» электрона «зеркальный» лист объединяется с основным листом, формируя плоское сверхпроводящее ядро электрона путём фазового перехода, описываемого суперсимметричной моделью Ландау-Гинзбурга. Ядро электрона, которое в предыдущих отчётах рассматривалось как аналог известной модели мешка, формируемого полем Хиггса, при использовании формализма суперсимметрии приводит к появлению двух полей Хиггса, формирующих две струнные моды возбуждения — «левую» и «правую», связанные соответственно с электронным и позитронным полями.

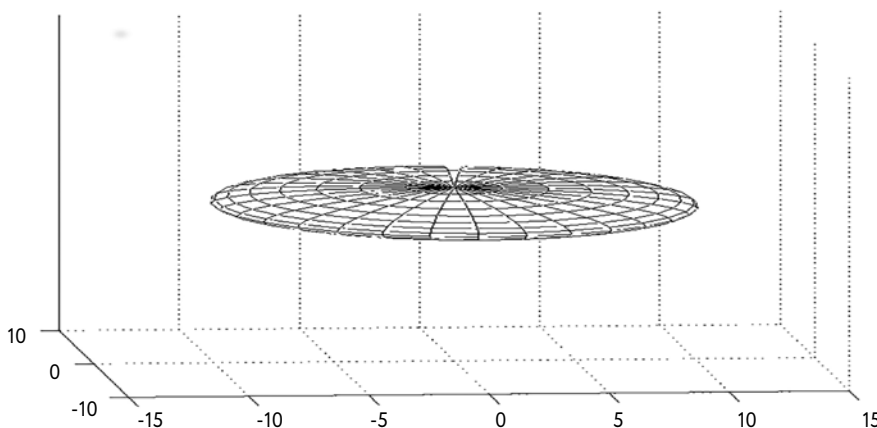


Рис.2.4.18 – Сверхпроводящее ядро электрона, в форме свободного от гравитации диска. «Лицевая» и «тыльная» стороны ядра электрона образуют две границы C^+ и C^- с соответствующими векторными полями A^+ и A^- .

В новой модели «одевания» электрона гравитационным полем (рис. 2.4.18) ядро частицы формируется гравитационным затягиванием пространства (frame-dragging) двумя петлями Вильсона на границах C^+ и C^- . Установлено, что петли Вильсона формируются только касательными к ядру компонентами электромагнитного потенциала, и временные компоненты не участвуют в затягивании. В частности, запаздывающая временная компонента потенциала $A0^+$ связана с формированием электромагнитной полевой массы электрона m , которая входит в уравнение Дирака, а также в основные соотношения метрики Керра $J=ma$. Энергетический вклад от границ C^+ и C^- дается интегралами Вильсона от потенциалов A^+ и A^- , для которых фазовый набег должен быть кратен $+2\pi$ или -2π , что дает условие квантования углового момента. Суммарный вклад петель Вильсона не влияет на заряд ядра электрона, но даёт сильный электромагнитный вклад в энергию электронно-позитронного вакуума, порождая магнитно-связанную пару монополя и антимонполя Дирака. Захваченная линиями Вильсона гравитационная энергия воздействует на массу электрона m нелинейно, через изменение радиуса частицы a в основном соотношении Керра. В результате радиус ядра электрона приобретает комптоновский масштаб, что объясняет увеличение на 22 порядка масштаба гравитационного взаимодействия по сравнению с общепринятым планковским масштабом, не учитывающим влияние петель Вильсона.

В перспективе планируется рассмотрение волновых свойств электрона КН, связанных с процессом приёма и передачи входящих и исходящих электромагнитных волн. Предполагается, что это позволит объяснить известный эксперимент интерференции картины при взаимодействии электрона с двумя щелями.

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 2022 году в рамках названной темы было продолжено [детальное изучение свойств аномально низко лежащего изомерного состояния в ядре \$^{229}\text{Th}\$](#) .

Теоретически исследован процесс когерентного возбуждения низколежащего изомерного состояния $3/2^+$ (8.338 ± 0.024 эВ) в ядре ^{229}Th (или иначе часового M1+E2 перехода VUV диапазона с длиной волны 148.71 ± 0.42 нм между основным и первым возбужденным уровнями ядра) лазерным излучением, настроенным в резонанс с ядерным переходом. Показано, что такой процесс в широкозонном диэлектрике обеспечивает быструю накачку системы ядерных изомеров за времена Раби (для существующих лазеров это могут быть доли секунды). При этом с частотой Раби происходят осцилляции альфа-распада основного и изомерного состояний (рис. 2.4.19).

Обнаружено, что при наличии примесных электронных состояний в запрещённой зоне диэлектрика и, как следствие, дополнительных каналов распада изомера $^{229\text{m}}\text{Th}$, в системе может развиваться эффект Зенона — «замерзание» ядер ^{229}Th в основном состоянии

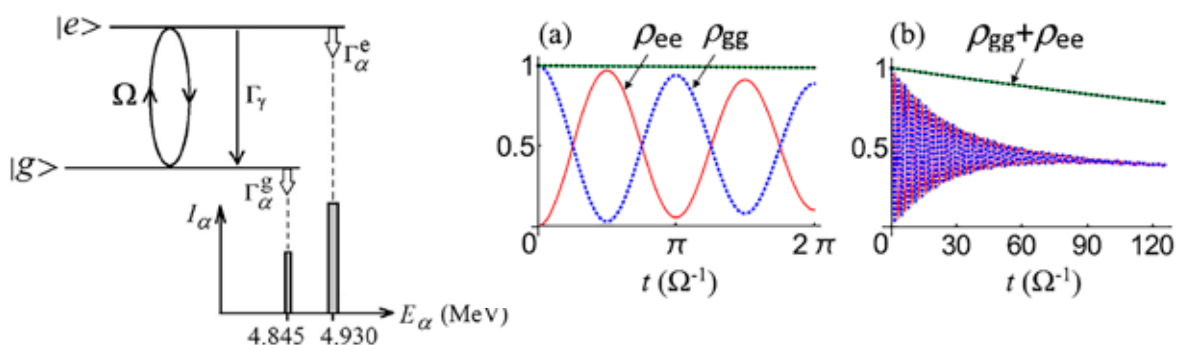


Рис. 2.4.19 – Осцилляции альфа-распадов основного $|g\rangle$ и изомерного $|e\rangle$ уровней ядра ^{229}Th при когерентном возбуждении изомера лазерным излучением с частотой Раби в широкозонном диэлектрике при наличии медленного радиационного канала распада с шириной $\Gamma_\gamma \ll \Omega$.

5/2+(0.0) (рис. 2.4.20). При этом, несмотря на прямое воздействие резонансного излучения, ядро ^{229}Th не возбуждается, а детектор, соответственно, не регистрирует никаких признаков распадов изомерного уровня.

Предложена схема наблюдения эффекта Зенона по схеме Кука при одновременном воздействии на ядра ^{229}Th резонансного оптического с длиной волны 149 нм и синхротронного с энергиями фотонов 29 кэВ излучений (рис. 2.4.21). При этом ядра ^{229}Th сначала возбуждаются π -импульсом на частоте Раби ρ на изомерное состояние $|e\rangle$, а затем подвергаются периодическому воздействию коротких импульсов рентгеновского излучения, настроенных в резонанс с переходом между уровнем $|e\rangle$ и состоянием 5/2+(29.2 кэВ, 82 пс). Если частота такого «опроса» уровня $|e\rangle$ рентгеновскими импульсами будет много больше частоты Раби Ω , распад изомерного состояния на основной уровень ядра ^{229}Th прекратится.

Продолжены исследования по взаимодействию атомов Th с химическим окружением, в частности, с наноструктурами. Впервые изучен характер химической связи атома Th с рядом новых бор-нитридных наноматериалов — фуллеренами $\text{B}_{30}\text{N}_{30}$, B_{12}N_8 , B_8N_{12} и аналогом коронена $\text{B}_{12}\text{N}_{12}\text{H}_{12}$. Ab-initio расчеты выполнены в рамках подхода функционала плотности с поправкой на дисперсию с гибридным обменно-корреляционным потенциалом.

Показано, что предложенные нами наименьшие 20-атомные BN-фуллерены B_{12}N_8 , B_8N_{12} (рис. 2.4.22) стабильны и могут быть обнаружены экспериментально. Геометрически торий находится в центре этих структур, отодвигая внешнюю оболочку атомов B и N немного дальше от центра. Форма клетки B_{12}N_8 в молекуле $\text{Th}@\text{B}_{12}\text{N}_8$ сохраняется, тогда как форма молекулы B_8N_{12} в комплексе $\text{Th}@\text{B}_8\text{N}_{12}$ оказывается в значительной степени деформированной.

Первоначально плоская структура коронена $\text{B}_{12}\text{N}_{12}\text{H}_{12}$ в присутствии тория становится гофрированной, демонстрируя выраженные внеплоскостные смещения атомов, расположенных под атомами тория (рис. 2.4.23). В 60-атомном фуллерене $\text{B}_{30}\text{N}_{30}$, являющемся BN-аналогом C_{60} , обнаружены две конформации $\text{Th}@\text{B}_{30}\text{N}_{30}$: одна с торием, обращённым к шестиугольнику с одной

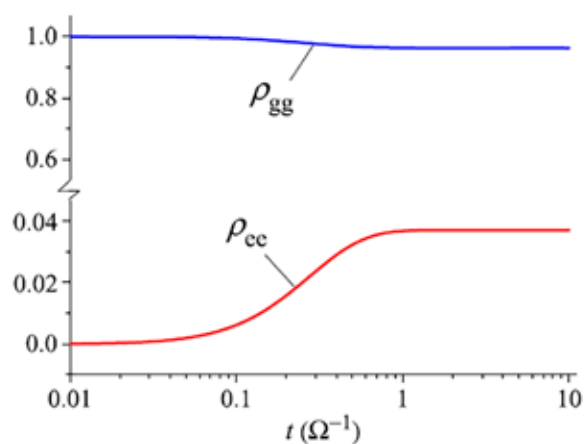
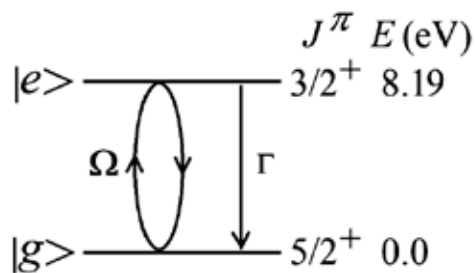


Рис. 2.4.20 — «Замерзание» (вероятность заселённости $\rho_{gg} \approx 1$) системы в основном состоянии $|g\rangle$ при наличии канала распада Γ при возбуждении изомерного состояния $|e\rangle$ когерентным лазерным излучением с частотой Раби Ω . Графики даны для $\Gamma = 10 \Omega$.

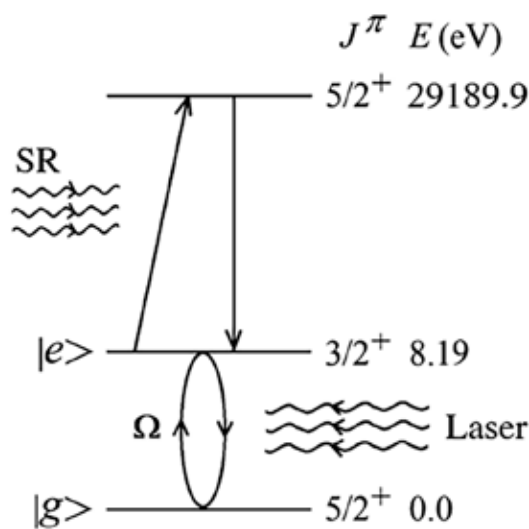


Рис. 2.4.21 — Схема Кука наблюдения эффекта Зенона на ядре ^{229}Th

ковалентной В–В и одной N–N связями, и вторая, лежащая на 0.8 эВ выше, с торием, расположенным близко к центру пятиугольника с одной ковалентной В–В связью (рис. 2.4.24).

Продолжены детальные исследования физико-химических свойств конденсированных плёнок твёрдого аргона на поверхности золота. Измерены спектры потерь энергии отражённых электронов и рентгеновские фотоэлектронные спектры при гелиевых температурах. Расчёты в рамках теории функционала плотности воспроизводят экспериментальные спектры с хорошей точностью. Выявлены экситонные пики внутри запрещённой зоны. Показано, что их положение (энергия) меняется в зависимости от температуры образца. Это открывает возможность «настройки» экситонного излучения на энергию изомерного ядерного перехода в ^{229}Th .

Для целей ядерной медицины теоретически исследованы связанные состояния одного и двух атомов В внутри и снаружи фуллера C_{60} . Дело в том, что потенциально пригодное для лечения онкологических опухолей радиоактивное с периодом полураспада 52 дня ядро ^7Be образуется в реакции $^{10}\text{B}(p,\alpha)^7\text{Be}$ с протонами с энергиями около 100 эВ. Такая реакция внутри фуллера приводит к появлению комплекса $^7\text{Be}@\text{C}_{60}$, обеспечивая защиту организма от химически токсичного бериллия. Найдены положения атома бора и молекулы B_2 в экзоэдрических комплексах $\text{B}-\text{C}_{60}$, B_2-C_{60} и в эндоэдрических комплексах $\text{B}@\text{C}_{60}$ и $\text{B}_2@\text{C}_{60}$. Для двух атомов бора вне клетки C_{60} оптимальное расположение реализуется, когда молекула B_2 присоединена одним атомом бора к средней точке двойной связи C_{60} или когда два атома бора находятся над двумя средними точками двойной связи по разные стороны от C_{60} . Два эндоэдрических атома бора могут лежать на линии, соединяющей либо две противоположные середины двойных связей, либо два центра противоположных пятиугольников. В случае, если один атом бора находится внутри, а другой вне клетки, оптимальным является расположение атомов выше и ниже двух соседних атомов углерода, принадлежащих одному и тому же шестиугольнику C_{60} . Приведённые конфигурации имеют разные спиновые состояния: в экзоэдрическом комплексе B_2-C_{60} $S = 1$, в эндоэдриальном $\text{B}_2@\text{C}_{60}$ $S = 2$ (как и в изолированной молекуле B_2), тогда как для одного атома бора внутри, а другого вне клетки $S = 0$.

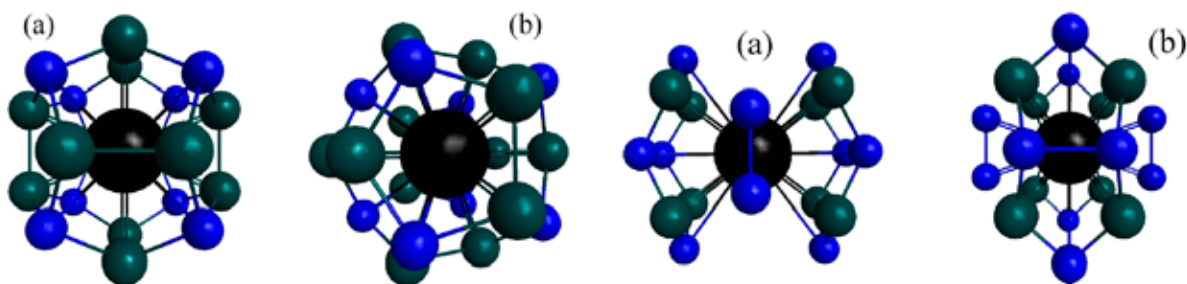


Рис. 2.4.22 – Оптимизированные молекулы $\text{Th}@\text{B}_{12}\text{N}_8$ (слева) и $\text{Th}@\text{B}_8\text{N}_{12}$ (справа). (a) и (b) – виды с разных направлений. Th – чёрный, В – зелёный, N – синий

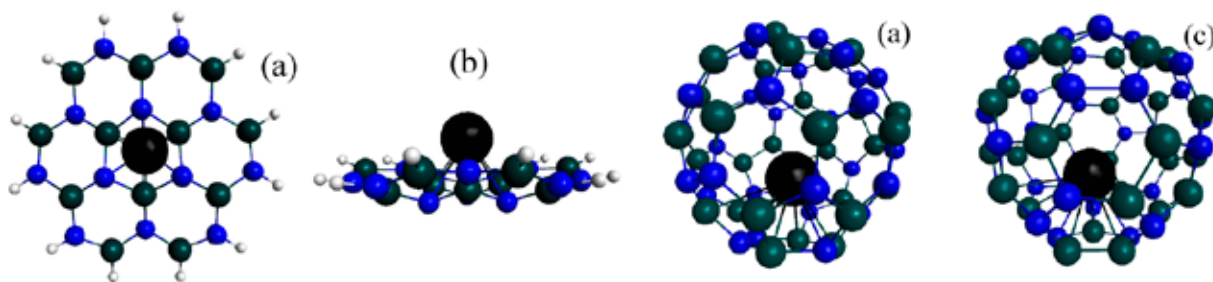


Рис. 2.4.23 – Структура молекулы $\text{Th}-\text{B}_{12}\text{N}_{12}\text{H}_{12}$. Цвета те же, что и на рис. 2.4.22

Рис. 2.4.24 – Две оптимизированные позиции атома Th (чёрный) в бор-нитридном фуллере $\text{B}_{30}\text{N}_{30}$

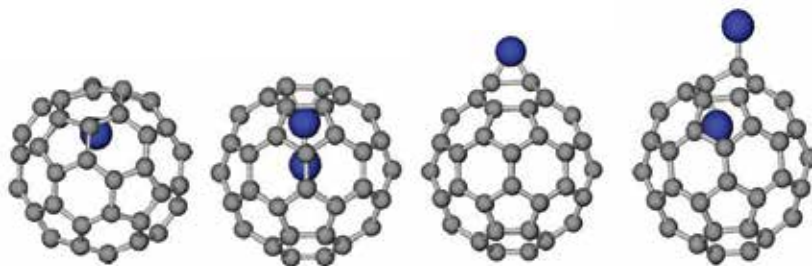


Рис. 2.425 – Примеры расположения атомов бора внутри и снаружи фуллера C₆₀

► Все приведённые выше исследования носят пионерский характер, а полученные в рамках этих работ результаты являются оригинальными и публикуются впервые. В 2023 году планируется продолжить изучение свойств низкоэнергетического изомерного перехода в ядре ²²⁹Th с тем, чтобы заложить основы создания в будущем нового (ядерного) стандарта времени и частоты и гамма-лазера оптического диапазона.

КЛЮЧЕВЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАБОТ

- Peter S. Kondratenko, Asymptotic theory of the classical impurity transport. Fermat's principle, *Annals of Physics*, 447 (2022) 169002.
- П.С. Кондратенко, А.В. Мухаряпова. Асимптотическая теория классического переноса примеси в неоднородных средах, Принцип Ферма. // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*, 2022. – Т. 162, вып. 5(11), – С. 737–742.
- А.Р. Аветисян, О.О. Корчагина, Л.В. Матвеев. Кинетическая модель эволюции жидких включений в соляных породах при высоких градиентах температуры // *Радиоактивные отходы*, 2022. – № 18, – С. 86–90.
- А.Р. Аветисян, О.О. Корчагина, Л.В. Матвеев. Модель термомиграции жидкого включения в монокристалле галитов в однородном поле градиента температуры // *Радиоактивные отходы*, 2022. – № 19, – С. 100–104.
- Васильев А.Д., Долганов К.С., Киселёв А.Е., Матвеев Л.В., Семёнов В.Н. Инженерная модель окисления слоя бериллиевой пыли в условиях аварии с истечением теплоносителя из системы охлаждения в вакуумную камеру ИТЭР // *Вопросы атомной науки и техники (ВАНТ). Серия Термоядерный синтез*, 2022. – Т. 45, вып. 2, – С. 37–49.
- Hollands T., Beuzet E., Le Belguet A., Vasiliev A., Kaliatka T., Birchley J., Kostka P., Steinbrück M., Stuckert J., Hozer Z. Status of Benchmark Exercises in the Frame of the NUGENIA QUESA Project // *Proc. 19th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-19)*, Brussels, Belgium, March 6–11 (2022).
- Obukhov Yu.N. Dynamics of a fermion with dipole moments in external wave fields // *J. Phys.: Conf. Ser.* – 2022. – Vol. 2191 – P. 012016.
- Obukhov Yu.N. Conservation laws in gauge gravity theory // *Int. J. Geom. Meth. Mod. Phys.* – 2022. – Vol. 19, – Supp. 01. – P. 2240002.
- Bini D., Mashhoon B., Obukhov Yu.N. Gravitomagnetic helicity // *Phys. Rev. D.* – 2022. – Vol. 105. – P. 064028.
- Obukhov Yu.N. Momentum of light in complex media // *Turk. J. Phys.* – 2022. – Vol. 46. – P. 122–154.
- Burinskii A. Gravitating electron based on overrotating Kerr-Newman solution // *Universe.* – 2022. – Vol. 8(11). – P. 553.
- Burinskii A. Appell's correspondence unifies gravity with quantum theory // *Gravitation and Cosmology.* – 2022. – Vol. 28. – P.342–351.
- E.V. Tkalya. Features of coherent excitation of ²²⁹mTh // *Nuclear Physics A*, Vol. 1022, 122428 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2022.122428>.
- U.N. Kurelchuk, P.V. Borisyuk, E.V. Chubunova, S.Z. Karazhanov, N.N. Kolachevsky, Yu.Yu. Lebedinskii, D.A. Myzin, A.V. Nikolaev, E.V. Tkalya. Spectroscopic studies of solid Ar condensed on a gold surface // *Materials Letters*, Vol. 306, 130930 (2022). <https://doi.org/10.1063/5.0102419>.
- A.V. Bibikov, A.V. Nikolaev, I.V. Bodrenko, P.V. Borisyuk, E.V. Tkalya, Multiple locations of boron atoms in the exohedral and endohedral C60 fullerene // *Physical Review A*, Vol. 105, 022813 (2022). DOI: 10.1103/PhysRevA.105.022813.
- U.N. Kurelchuk, A.V. Nikolaev, P.V. Borisyuk, and E.V. Tkalya. Chemical bonding between thorium and novel BN nanomaterials // *Journal of Applied Physics*. 132, 124302 (2022); DOI: 10.1063/5.0102419.

3 Развитие инфраструктуры

В ИБРАЭ РАН постоянно проводятся мероприятия по развитию инфраструктуры и созданию оптимальных условий для эффективной деятельности ученых. Они включают:

- 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 2022 году выполнены 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 ИБРАЭ РАН достигла **290 TFlops**;
- ядро локальной вычислительной сети расширено и имеет производительность **10 Гбит/с**;
- осуществляется переход критически важных рабочих мест на сеть **1 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 возможность работы в дистанционном режиме;
- расширены функциональные возможности централизованной системы **видеоконференцсвязи ИБРАЭ РАН** (polycom), реализована поддержка полностью удаленных решений;
- обновлена **служба каталогов** корпорации Microsoft;
- создан **корпоративный сервер коммуникаций eXpress**;
- приобретено и введено в эксплуатацию более **100 единиц высокопроизводительных ПК**, рабочих станций и серверов.

Характеристики кластера ИБРАЭ РАН:

- пиковая производительность – **239.8** TFlop/s;
- использует межзловое 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 **16128** CUDA-ядер;
- реализована отказоустойчивая СХД объемом **160** ТБ;
- узел визуализации на базе двух графических ускорителей **NVIDIA RTX 6000** содержит **9216** микроядер;
- находится на **26** месте в ТОП-50 суперкомпьютеров России <http://top50.supercomputers.ru/list>.

Своевременное обслуживание системы коммуникаций Института обеспечило в 2022 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» и его секций, международных онлайн-семинаров, лекций и семинаров по специальности для студентов, обучающихся на кафедрах Института, 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 2022 году активно использовались высокопроизводительные лазерные сканеры, предназначенные для оперативного создания цифровых моделей объектов и трехмерных моделей местности.

**КЛАСТЕР ИБРАЭ РАН
НАХОДИТСЯ НА**

26 месте

**В ТОП-50
СУПЕРКОМПЬЮТЕРОВ
РОССИИ**

4 Международное сотрудничество



Начальник отдела

Л. Г. Шпинькова

к.ф.-м.н.

(lgs@ibrae.ac.ru)

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С МЕЖДУНАРОДНЫМИ ОРГАНИЗАЦИЯМИ

Сотрудничество с Международным агентством по атомной энергии (МАГАТЭ)

Специалисты ИБРАЭ РАН традиционно принимают активное участие в работе Международного агентства по атомной энергии: участвуют в крупных международных мероприятиях, технических совещаниях по конкретным научно-техническим направлениям, работают в комитетах МАГАТЭ в качестве экспертов и участвуют в международных исследовательских проектах под эгидой МАГАТЭ.

Участие в проектах

В 2022 году специалисты ИБРАЭ РАН участвовали в 7 международных исследовательских проектах МАГАТЭ, включая один новый проект, начатый в отчетном периоде:

1. «Расчет нейтронных характеристик пусковых тестов CEFR с использованием транспортных (CORNER) и диффузионных компьютерных кодов нового поколения» (отв. В.П. Березнёв) в рамках согласованного проекта исследований МАГАТЭ 31032 «Бенчмарк нейтронных характеристик пусковых тестов CEFR».

Основная работа над проектом была завершена к апрелю 2022 года, в ноябре состоялось заключительное совещание рабочей группы, в настоящее время готовится выпуск итогового отчёта, который должен быть опубликован весной 2023 г.

2. «Анализ протекания аварии ULOF без срабатывания АЗ в реакторе FFTF с использованием расчётного кода ЕВКЛИД/V2» (отв. Н.А. Мосунова, С.В. Цаун) в рамках согласованного проекта исследований МАГАТЭ I32011 «Анализ протекания аварии ULOF без срабатывания АЗ в реакторе FFTF».

Проект был продлён до конца 2022 года, в течение которого шла подготовка к выпуску заключительного технического документа. Специалисты ИБРАЭ РАН в этот период участвовали в проекте в качестве наблюдателей. Итоговый отчёт должен быть опубликован в 2023 г.

3. «Применение кода NOSTRADAMUS для определения зон при планировании защитных мер с учетом метеорологических данных для конкретных площадок на основе четырёхмерных метеорологических полей» (отв. А.А. Киселёв) в рамках согласованного проекта исследований МАГАТЭ J15002 «Эффективное использование инструментов прогнозирования доз в процессе обеспечения готовности к ядерным и радиологическим чрезвычайным ситуациям и при реагировании на них»

2022 год — это завершающий год работы по проекту. В отчётном периоде проведены исследования подходов, приближений и учитываемых факторов при моделировании размеров зон планирования защитных мероприятий. Исследовалось применение лагранжевой модели атмосферного переноса NOSTRADAMUS для оценки/подтверждения размеров и расстояний планирования защитных мероприятий. Проведены численные эксперименты, показавшие преимущества и ограничения концепции предварительного зонирования.

Участники международного проекта выполняли кросс-расчёты последствий гипотетических радиоактивных выбросов. Специалисты ИБРАЭ РАН принимали участие во всех расчётах, используя современные технологии. Участие в проекте позволило проанализировать и выявить их преимущества и ограничения.

В 2022 году были проведены расчёты для двух гипотетических аварий на фиктивных объектах (АЭС и авария на транспорте). Результаты были оформлены в виде презентационных материалов и обсуждены на третьем совещании МАГАТЭ, в котором принял очное участие А.А. Киселёв (с тремя докладами).

На совещании были также обобщены результаты трёхлетних исследований и обсуждены преимущества и недостатки инструментов анализа и прогноза неопределённостей, связанных с эффективным использованием инструментов на этапах аварийной готовности и реагирования (одну из рабочих групп на совещании возглавил А.А. Киселёв).

Результаты исследований (включая полученные при проведении совместных тренировок) были обобщены в виде финального отчёта по проекту. По итогам выполнения этого международного проекта МАГАТЭ рассматривает возможность организации нового координационного проекта, направленного на развитие полученных компетенций.

4. «Определение и оценка источников неопределённостей и их влияния на расчёты ключевых параметров по тяжелоаварийному коду СОКПАТ/ВЗ» (отв. В.Н. Семёнов, Н.И. Рыжов) в рамках согласованного проекта исследований МАГАТЭ I31033 «Улучшение положения дел в методологии оценки неопределённостей и чувствительности для анализа тяжёлых аварий в реакторах с водяным охлаждением»

Начало проекта — 2019 г., окончание — июнь 2024 г. В рамках проекта выполняется анализ неопределённостей применительно к двум задачам: анализу эксперимента QUENCH-06 и тяжёлой аварии на РУ ВВЭР-1000. ИБРАЭ РАН принимает участие в обеих задачах.

За прошедший год специалисты ИБРАЭ РАН провели анализ чувствительности и кластеризации результатов расчетов для эксперимента QUENCH-06. Полученные результаты обсуждались на 4-м координационном совещании, где было отмечено, что полученные выводы весьма полезны с практической точки зрения, и они были включены в проект технического документа по результатам проекта (TECDOC). В совещании принял участие Н.И. Рыжов (с двумя докладами). Для совещания была подготовлена глава в проект TECDOC с описанием результатов ИБРАЭ РАН.

В задаче анализа неопределённостей тяжёлой аварии РУ ВВЭР-1000 ИБРАЭ РАН занимает руководящую роль и координирует других участников задачи из НИЦ Курчатовский институт, Гидропресс, Энергоатом. За прошедший год участники группы углубили анализ выбранных сценариев. В частности, наши специалисты рассмотрели дополнительные источники неопределённостей, влияющие на результаты расчётов. **В 2023 году планируется выпуск проекта TECDOC по данной задаче и передача его на рецензирование экспертам МАГАТЭ.**

5. «Применение кода HEFEST_URAN в экспериментальных/аналитических бенчмарках и участие в разработке PIRT и валидационной матрицы» (отв. А.С. Филиппов) в рамках согласованного проекта исследований МАГАТЭ J46002 «Разработка таблиц определения и классификации явлений (PIRT), валидационной матрицы, а также выполнение бенчмарка для внутрикорпусного удержания расплава»

Начало проекта — июль 2020 г., окончание — октябрь 2024 г. ИБРАЭ РАН в указанном проекте выполняет количественную оценку воздействия условий внутрикорпусного удержания расплава (IVMR) на риски IVMR и классификацию отдельных факторов для таблиц определения и классификации явлений (PIRT), подготовку и проведение расчётных бенчмарков.

В 2022 году в соответствии с заявленным участием в четвёртом, самом большом разделе работ по проекту, посвящённому стационарным бенчмаркам, были подготовлены входные наборы данных по первой и второй части бенчмарка по ВВЭР-1000 (расплав на днище корпуса, ответственный: ИБРАЭ РАН). Получены предварительные результаты расчётов участников по первой части. **Вторая часть бенчмарка должна быть закончена в 2023 г.**

В отчётном периоде была проведена серия расчётов в рамках задач бенчмарка generic PWR (ответственный: IRSN).

После проведённой доработки кода HEFEST_URAN стало возможным участие также в бенчмарке по термохимии расплава (ответственный: EDF). **Эта работа, вместе с подготовкой публикации, запланирована на 2023 г.**

В 2022 году проведены рабочая встреча и ежегодное совещание по проекту, в которых принял участие А.С. Филиппов. На итоговом совещании было сделано два плановых доклада, один — с отчётом о проделанной работе, второй — посвящённый предложениям ИБРАЭ РАН по методологии получения количественных оценок для поддержки экспертных суждений по ранжированию факторов влияния в PIRT-таблице. На совещании была достигнута договорённость об обсуждении и пробном применении этой методики для построения PIRT-таблицы.

6. «Численное исследование характеристик аварийно-устойчивого топлива в условиях запроектных аварий с помощью интегрального кода СОКРАТ» (отв. К.С. Долганов) в рамках согласованного проекта исследований МАГАТЭ T12032 «Тестирование и моделирование передовых технологий и аварийно-устойчивых видов топлива (ATF-TS)»

Начало проекта — март 2021 г., окончание — август 2024 г. Задачи ИБРАЭ РАН включают численное моделирование интегральных экспериментов по заливке водой перегретых пучков имитаторов твэлов с оболочками из сплава FeCrAl (стенд **QUENCH**) и хромированного циркониевого сплава (стенды **DEGREE** и **CODEX**) при помощи кода СОКРАТ и участие в соответствующих сравнительных анализах (бенчмарках) результатов расчётов, полученных по программам-аналогам другими участниками проекта.

В 2022 году специалисты ИБРАЭ РАН приняли участие в двух консультационных совещаниях (в режиме онлайн), на которых представили доклады о текущих результатах разработки и валидации физических моделей окисления новых сплавов в программе СОКРАТ, а также о результатах расчётов экспериментов QUENCH-19 и DEGREE S2. В докладах была показана важность обеспечения наилучшего воспроизведения температурного режима имитаторов твэлов в области наибольших температур для корректной оценки качества прогноза источника выделившегося водорода и качества используемых корреляций для окисления сплавов водяным паром.

Ожидается, что **основные результаты по проекту будут получены исследователями ИБРАЭ РАН в 2023 году**, когда участникам станут доступны результаты интегральных экспериментов на стендах **DEGREE** и **CODEX**.

7. «Бенчмарк процесса перехода от принудительной к естественной циркуляции в эксперименте с жидкометаллическим контуром» (отв. Н.А. Мосунова, О.Х. Ильясова) в рамках согласованного проекта исследований МАГАТЭ I31038 «Бенчмарк процесса перехода от принудительной к естественной циркуляции в эксперименте с жидкометаллическим контуром»

Проект был начат в мае 2022 г. и продлится до августа 2026 г. После ознакомления с материалами бенчмарка, в частности, с техническими характеристиками экспериментальной установки и результатами, ИБРАЭ РАН в рамках проекта подготовит расчётную модель и проведёт моделирование эксперимента с помощью компьютерных кодов и сравнение с экспериментальными результатами.

О.Х. Ильясова участвовала в совещании по проекту в июле 2022 года с докладом о деятельности Института и характеристиках кода, который планируется использовать для расчётов. В отчётном периоде был проведён анализ экспериментальных данных и сделаны предварительные аналитические оценки.

Участие в Комитетах и рабочих группах МАГАТЭ

Специалисты ИБРАЭ РАН А.А. Киселёв и И.Л. Абалкина в 2022 г. продолжили работу в качестве экспертов от Российской Федерации в Комитете МАГАТЭ по стандартам в области аварийной готовности и аварийного реагирования (Emergency Preparedness and Response Standards Committee, EPRSC) и в Комитете МАГАТЭ по стандартам в области безопасного обращения с РАО (Waste Safety Standards Committee, WASSC) соответственно.

В 2022 году специалист ИБРАЭ РАН В.И. Шпиньков продолжил работу в рабочей группе по подготовке документов МАГАТЭ, посвящённых регулированию и оценке безопасности и особенностям проектирования термоядерных установок. Рабочей группой был начат сбор информации о мнениях организаций, работающих над проектами термоядерных установок в странах-членах МАГАТЭ, относительно применяемых подходов к обеспечению безопасности при проектировании. Для практической реализации сбора мнений была организована подготовка опросника МАГАТЭ по подходам к проектированию термоядерных электростанций (ТЯЭС) и использованию имеющегося практического опыта.

ИБРАЭ РАН в качестве контактной организации от Российской Федерации в работах МАГАТЭ по формированию рекомендаций по безопасности термоядерных реакторов организовал работу по переводу опросника, рассылке опросника в организации-участники термоядерной программы и сбору материалов для передачи в МАГАТЭ. Подготовленные материалы будут использованы в дальнейшей деятельности рабочей группы.

Участие в деятельности международной «Сети управления природопользованием и экологической реабилитации» (ENVIRONET)

Сеть ENVIRONET была создана под эгидой МАГАТЭ в 2009 г. с целью содействия государствам-членам в повышении компетенций в реализации проектов реабилитации. Она объединяет профессионалов в области восстановления окружающей среды всех стран, входящих в МАГАТЭ, с целью повышения эффективности обмена опытом между странами-участницами.

Наиболее востребованным в ИБРАЭ направлением деятельности в рамках сети ENVIRONET являются межрегиональные учебные курсы по различным аспектам вывода из эксплуатации и реабилитации, которые организуются в рамках проектов технического сотрудничества. Шесть сотрудников ИБРАЭ РАН были участниками таких курсов в 2017—2022 гг.

И.Л. Абалкина участвовала в подготовке и реализации первого этапа проекта МАГАТЭ «Ограничения для выполнения вывода из эксплуатации и реабилитации» (CIDER), который осуществлялся в рамках Сети ENVIRONET. С 2020 г. И.Л. Абалкина является специальным советником (Special Adviser) Управляющего комитета ENVIRONET.

В 2022 году деятельность ИБРАЭ РАН в рамках ENVIRONET включала участие наших специалистов (И.Л. Абалкина) в заседаниях Управляющего комитета ENVIRONET, в форуме участников Сети ENVIRONET и в ряде вебинаров, проводившихся под эгидой Сети ENVIRONET (в режиме онлайн). О.А. Ильина приняла участие (в дистанционном режиме) в Межрегиональном обучающем курсе МАГАТЭ «Совместное принятие решений в вопросах реабилитации окружающей среды после снятия с регулирующего контроля» (IAEA Interregional Training Course on Participatory Decision-Making in Environmental Remediation and Site Release from Regulatory Control), которые были организованы в рамках проекта технического сотрудничества INT2020.

Участие в совместных учениях и тренировках

1. Учение ConvEx-2a

16 ноября 2022 года специалисты ЦНТП ИБРАЭ РАН совместно с ЧУ «СКУ Росатома» приняли участие в учении ConvEx-2a, организованном МАГАТЭ. Основная цель учения — проверка эффективности передачи информации об аварии в Центр инцидентов и аварийных ситуаций МАГАТЭ (IEC) с использованием установленных форм.

2. Тренировка по реагированию на гипотетическую аварию на транспорте

В рамках действующего международного проекта МАГАТЭ «Эффективное использование прогностических инструментов для обеспечения готовности и реагирования на ядерные и радиологические аварийные ситуации» (CRP J15002) в декабре 2022 года ЦНТП ИБРАЭ РАН принял участие в [противоаварийной тренировке по реагированию на гипотетическую аварию на транспорте](#). Эксперты ЦНТП ИБРАЭ РАН провели расчеты атмосферного переноса и возможных доз облучения населения в ансамблевом подходе. Получены диапазоны прогнозируемых доз с учетом имеющихся неопределённостей.



Специалисты ЦНТП ИБРАЭ РАН приняли участие в противоаварийной тренировке по реагированию на гипотетическую аварию на транспорте

Участие в конференциях и совещаниях

Сотрудники ИБРАЭ РАН приняли участие более чем в **30** различных мероприятиях МАГАТЭ в 2022 г., включая совещания по совместным исследовательским проектам, большие международные конференции, совещания Руководящего комитета сети МАГАТЭ «ENVIRONET», учебные курсы, региональные и межрегиональные семинары в рамках проектов технического сотрудничества МАГАТЭ (например, Межрегиональный учебный курс по оценке безопасности и воздействию на окружающую среду объектов, подлежащих выводу из эксплуатации, г. Ангра-дос-Рейс, Бразилия), вебинары по различным тематикам.



Межрегиональный учебный курс по оценке безопасности и воздействию на окружающую среду объектов, подлежащих выводу из эксплуатации, г. Ангра-дос-Рейс, Бразилия



Сотрудники ИБРАЭ РАН С.С. Уткин, А.А. Самойлов, Е.Г. Мамчиц приняли участие в работе седьмого совещания Договаривающихся сторон Объединенной конвенции о безопасности обращения с отработавшим топливом и о безопасности обращения с радиоактивными отходами, которое проходило с 27 июня по 8 июля 2022 г. в штаб-квартире МАГАТЭ (г. Вена, Австрия).

Отметим участие представителей ИБРАЭ РАН С.С. Уткина, А.А. Самойлова, Е.Г. Мамчица в **7-м совещании** Договаривающихся сторон по рассмотрению национальных докладов Объединенной конвенции МАГАТЭ, проходившем в очном формате в штаб-квартире МАГАТЭ (г. Вена, Австрия) в июне 2022 года. Специалисты ИБРАЭ РАН осуществляли экспертно-аналитическую поддержку Российской делегации на Совещании. Впервые в истории представления национальных докладов Российской Федерации участниками Объединенной конвенции в рамках наиболее престижной номинации «Good Practice» был зафиксирован значительный прогресс России в реализации замкнутого ядерного топливного цикла, целесообразный к использованию в других странах.

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

Начало 2022 года было отмечено тесным научно-техническим сотрудничеством ИБРАЭ РАН с Агентством по ядерной энергии (АЯЭ). Специалисты ИБРАЭ РАН продолжили работу в **3** комитетах и **18** рабочих и экспертных группах АЯЭ, приняли участие в **11** тематических совещаниях, продолжили работу по четырем крупным международным проектам под эгидой АЯЭ, участвовали в обсуждении и подготовке новых проектов.

Однако в связи с решением Совета ОЭСР о приостановлении членства Российской Федерации в АЯЭ было прекращено участие экспертов ИБРАЭ РАН в деятельности рабочих органов Агентства и остановлены практически все коммуникации с Секретариатом АЯЭ.

Исключением стал проект «THEMIS» («Эксперименты TNAI по мерам смягчения последствий и вопросам определения источника выброса для поддержки анализа и дальнейшего совершенствования управления тяжёлыми авариями» (совместно с ГК по атомной энергии «Росатом») (отв. А.Е. Киселев и А.А. Канаев), участие в котором было продолжено. Исполнитель (Becker Technologies GmbH) подготовил экспериментальную установку и проводит эксперименты серии HD 47-51 по исследованию крупномасштабного горения водорода в условиях малого содержания кислорода при наличии монооксида углерода и углекислого газа в атмосфере экспериментальной установки. Исполнитель подготовил данные по результатам нескольких экспериментов и черновик отчёта по итогам первого слепого бенчмарка на основе эксперимента HD-57. Специалисты ИБРАЭ РАН заинтересованы в получении результатов экспериментов HD 47-51, которые, в соответствии с планом работ, проводятся в период с ноября 2022 по февраль 2023 г.

Проект ARC-F (Анализ информации, касающейся зданий реакторов и контейнментов атомной станции «Фукусима Дайичи») (совместно с ГК по атомной энергии «Росатом», отв. К.С. Долганов) был фактически завершён в январе 2022 года, когда наши специалисты передали в Секретариат АЯЭ результаты работы по проекту. К настоящему времени по результатам проекта подготовлена совместная статья под названием: «OECD/NEA-ARC-F project: Unit1 and Unit3 hydrogen explosion analysis. Lessons learned and perspectives».

Сотрудничество с Научным комитетом ООН по действию атомной радиации (НКДАР ООН)

На протяжении ряда лет ИБРАЭ РАН принимает участие в подготовке рабочих документов НКДАР. В задачи НКДАР входит проведение оценки и подготовка научных докладов об уровне и последствиях воздействия радиации на здоровье человека и окружающую среду. Доклады НКДАР признаются как источники авторитетной информации и используются в качестве научной основы для оценки радиационных рисков и разработке мер по защите от воздействия радиоактивного излучения.

В период с 9 по 13 мая 2022 года прошла **69-я сессия** Научного комитета по действию атомной радиации Организации Объединенных Наций (**НКДАР ООН**). В работе сессии приняли участие 153 эксперта из 31 страны, которые являются членами НКДАР ООН, а также представители 13 международных организаций. Российская делегация участвовала в формате видеоконференции. В работе сессии в качестве члена российской делегации принимала участие заведующая лабораторией проблем коммуникации при оценке риска Е.М. Мелихова. Она председательствовала от РФ на заседании, посвященном обсуждению текущего прогресса в работах по направлению «Облучение населения».

При подготовке к сессии в ИБРАЭ РАН был проведен детальный анализ отчета по стартовавшему в 2020 году проекту НКДАР ООН «Оценка облучения населения ионизирующим излучением от естественных и иных источников» и Доклада НКДАР ООН для представления на Генеральной ассамблее ООН.

По результатам работы 69-й сессии НКДАР ООН российская делегация подготовила статью для российской научной общественности в журнале ФМБА России:

(А.В. Аклеев, Т.В. Азизова, В.К. Иванов, Л.А. Карпикова, С.М. Киселев, Д.В. Кононенко, Е.М. Мелихова, В.В. Романов, С.А. Романов, Р.М. Тахауов, В.Ю. Усольцев, С.М. Шинкарев. Итоги 69-й сессии научного комитета по действию атомной радиации (НКДАР) ООН (Вена, 9–13 мая 2022 г.). // Мед. радиология и радиационная безопасность. 2022. — Т. 67.— № 5.— С. 24–32. — DOI: 10.33266/1024-6177-2022-67-5-24-32).

ДВУСТОРОННЕЕ СОТРУДНИЧЕСТВО С НАЦИОНАЛЬНЫМИ ОРГАНИЗАЦИЯМИ ЗАРУБЕЖНЫХ СТРАН

Сотрудничество с Китайской Народной Республикой

В 2020 году началось сотрудничество между ИБРАЭ РАН, ФГУП «НО РАО» и Пекинским научно-исследовательским институтом геологии урана (БРИУГ) в области долговременного хранения и захоронения радиоактивных отходов.

В рамках подписанного Соглашения о сотрудничестве 17 августа 2022 года состоялось очередное совещание с участием специалистов всех трёх организаций в дистанционном формате. В совещании приняли участие 20 российских и китайских специалистов. Было отмечено, что представленные организации уделяют большое внимание практике безопасного обращения с РАО и взаимовыгодному международному сотрудничеству.

Стороны обменялись информацией о работах, выполненных за прошедший год на площадках строительства национальных подземных лабораторий, обсудили важность научных подходов и моделирования при оценке безопасности пунктов захоронения радиоактивных отходов и договорились о проведении дополнительных семинаров по обмену информацией в области моделирования. Китайская сторона представила Проект МОНЕН, направленный на организацию международного сотрудничества по вопросам создания и ведения гидрогеологического мониторинга при строительстве ПИЛ (подземной исследовательской лаборатории) в кристаллических породах, а также по анализу и интерпретации получаемых данных и их использованию при моделировании движения грунтовых вод и переноса загрязнителей в системе трещин.

ИБРАЭ РАН высказал заинтересованность в участии в указанном проекте. В БРИУГ было направлено совместное письмо ИБРАЭ РАН и ФГУП НО РАО с просьбой рассматривать наши организации в качестве потенциальных участников проекта МОНЕН.

Сотрудничество с Турецкой Республикой

С 2020 года ИБРАЭ РАН ведет работы по договору с компанией **AKKUYU NÜKLEER ANONİM ŞİRKETİ** по теме: «Расчет радиологических последствий для режима нормальной эксплуатации и аварийных режимов АЭС «Аккую» с учетом актуальных параметров площадки расположения АЭС». **Окончание работ — август 2023 г.**

В 2022 году, в соответствии с планом работ, специалисты Отделения развития систем аварийной готовности и реагирования ИБРАЭ РАН провели требуемые для оценки безопасности расчёты радиологических последствий при проектных и запроектных авариях, расчёт санитарно-защитной зоны и зоны наблюдения АЭС «Аккую» по радиационным факторам, расчёт радиуса зоны предупредительных мероприятий и зоны планирования срочных мероприятий АЭС «Аккую» для задач аварийного реагирования.

В течение 2022 года проводилось сопровождение выполненных работ по обоснованию размещения постов АСКРО на основании зональной схемы размещения и результатов моделирования атмосферного рассеивания радионуклидов.

Сотрудничество со странами СНГ

ИБРАЭ РАН участвует в сотрудничестве со странами СНГ по профильным вопросам безопасности объектов ЯТЦ, радиационного мониторинга и аварийного реагирования.

В 2022 году ИБРАЭ РАН принял участие в [двух заседаниях Комиссии государств — участников СНГ по использованию атомной энергии в мирных целях](#):

- **22-е заседание** (26 января 2022 года, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург). На заседании руководитель ЦНТП ИБРАЭ РАН С.Н. Краснопёров выступил с докладом о проекте Соглашения об информационном взаимодействии государств — участников СНГ при проведении радиационного мониторинга, в разработке которого непосредственное участие принимали специалисты ЦНТП ИБРАЭ РАН. По итогам мероприятия представленный проект Соглашения был одобрен участниками вышеуказанной комиссии.
- **23-е заседание** (9 ноября 2022 года, Киргизская Республика, г. Бишкек). От ИБРАЭ РАН в заседании Комиссии принял участие руководитель ЦНТП ИБРАЭ РАН С.Н. Краснопёров, выступивший с докладом о техническом проекте создания системы обмена данными мониторинга радиационной обстановки стран СНГ для задач информационного взаимодействия и оперативного реагирования, подготовленным при активном участии специалистов ЦНТП ИБРАЭ РАН. Комиссия одобрила представленный доклад.

20—21 апреля 2022 года в Госкорпорации «Росатом» состоялся [международный научно-практический семинар «Формирование научно-обоснованных долгосрочных прогнозов радиационной обстановки в странах СНГ на основе данных мониторинга и с учётом реальных социально-экономических факторов»](#). В семинаре, помимо российских экспертов, приняли участие специалисты в области мониторинга радиационной обстановки от Республики Армения, Республики Беларусь, Республики Казахстан, Киргизской Республики, Республики Узбекистан.

Одной из основных тем мероприятия было обсуждение проекта Соглашения об информационном взаимодействии государств — участников СНГ при проведении радиационного мониторинга, разрабатываемого при участии ИБРАЭ РАН. О практическом опыте ИБРАЭ РАН в области создания объектовых и территориальных систем радиационного мониторинга и оперативного реагирования рассказал заместитель заведующего отделением Е.В. Антоний.

Решением семинара С.Н. Краснопёров был назначен [руководителем рабочей группы по координации работы экспертов — представителей государств-участников СНГ по разработке проекта Соглашения](#).

Республика Беларусь

ИБРАЭ РАН ведёт сотрудничество с белорусскими организациями уже на протяжении многих лет в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности, аварийной готовности и реагирования, защиты населения и территорий. Это сотрудничество началось с работ по преодолению радиологических последствий аварии на Чернобыльской АЭС, продолжалось по линии аварийной готовности и реагирования, и в настоящее время дополняется решением задач обращения с радиоактивными отходами.

В 2022 году было проведено несколько встреч с белорусскими коллегами и заложен [фундамент сотрудничества по безопасному обращению с РАО](#).

ИБРАЭ РАН планирует расширять сотрудничество с [Госатомнадзором Беларуси](#) и другими организациями по направлениям, связанным с реализацией совместных проектов и совершенствованием регулирующей нормативной правовой базы в области обращения с радиоактивными отходами, а также с научно-технической поддержкой органов управления и регулирования ядерной и радиационной безопасности.

В 2022 году Департамент по ядерной и радиационной безопасности Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь — Госатомнадзор Беларуси — отмечал своё 15-летие. ИБРАЭ РАН направил видеопоздравление Госатомнадзору Беларуси с этим замечательным праздником, отметив, что за годы нашей совместной работы был накоплен большой опыт успешного взаимодействия и сформированы планы на будущее, которые будут реализованы нашими молодыми и активными коллективами специалистов.

Участие в международных мероприятиях

Специалисты ИБРАЭ РАН в 2022 году приняли участие в **67** международных мероприятиях (международные форумы, конференции, семинары, технические и консультативные совещания, заседания комиссий, комитетов и рабочих групп, учебные курсы и вебинары), из них в **21** мероприятии участвовали очно, в остальных — в дистанционном режиме. Было сделано **37** докладов.

Выше приводились примеры участия специалистов ИБРАЭ РАН в конкретных мероприятиях МАГАТЭ, Комиссии СНГ и др. Здесь отметим участие специалистов Института в двух крупных международных мероприятиях.

Первое — XII Международный форум «**АТОМЭКСПО 2022**», который прошёл 21 ноября 2022 года в г. Сочи. В рамках форума состоялся круглый стол «Замкнутый ЯТЦ — новые возможности и тренды», модератором которого стал заведующий отделением ИБРАЭ РАН С.С. Уткин. Участники круглого стола обсудили стратегии и технологические решения по замыканию ЯТЦ энергетических реакторов.

Второе — крупнейшая международная конференция «**Быстрые реакторы и связанные с ними топливные циклы: устойчивая чистая энергия будущего (FR22)**», посвященная развитию технологии ядерных реакторов на быстрых нейтронах. Конференция прошла с 19 по 22 апреля 2022 года в г. Вена (Австрия) в гибридном формате (онлайн и офлайн).

FR22 стала четвертой по счёту конференцией по быстрым реакторам под эгидой МАГАТЭ. В ней приняли участие представители **35** стран. Это рекордный показатель за всё время проведения конференций FR, что свидетельствует о растущем интересе в мире к теме быстрых реакторов и замкнутых ядерных топливных циклов. Делегация ИБРАЭ РАН, возглавляемая заведующей отделением ИБРАЭ РАН Н.А. Мосуновой, приняла участие в конференции в режиме онлайн из делового центра АО «ОКБМ Африкантов» в Нижнем Новгороде, который стал основной площадкой для российских докладчиков. На конференции было представлено **200** устных и **100** стендовых докладов, наибольшее количество сообщений было сделано российскими учеными, включая **6** докладов специалистов ИБРАЭ РАН. Наибольший интерес участники конференции проявили к направлению моделирования, симуляции и цифровизации. Итогом конференции стал вывод о том, что быстрые реакторы и соответствующие технологии топливного цикла дают устойчивый источник энергии, обеспечивая сохранность природных ресурсов и снижение количества образующихся отходов.



Заведующий отделением ИБРАЭ РАН С.С. Уткин — модератор круглого стола «Замкнутый ЯТЦ — новые возможности и тренды», XII Международный форум «АТОМЭКСПО 2022»



На международной конференции «Быстрые реакторы и связанные с ними топливные циклы: устойчивая чистая энергия будущего (FR22)»

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, обеспечению наиболее широкого доступа для сотрудников Института к профильной научной литературе, популяризации достижений Института в области обеспечения безопасности атомной отрасли.

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

В 2022 году ИБРАЭ РАН продолжил 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 участия в обучающих вебинарах по наиболее актуальным проблемам работы с МББД.



ПРОФИЛЬНЫЕ КАФЕДРЫ

ИБРАЭ РАН осуществляет образовательную деятельность с целью обеспечения преемственности поколений и подготовки научных кадров в рамках сотрудничества с 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 Институтом.

КАФЕДРА ПРОБЛЕМ БЕЗОПАСНОГО РАЗВИТИЯ СОВРЕМЕННЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ МФТИ

ИБРАЭ РАН тесно сотрудничает в сфере научно-образовательной деятельности с одним из ведущих вузов России — [Московским физико-техническим институтом](#).

С 1992 года в ИБРАЭ РАН действует кафедра проблем безопасного развития современных энергетических технологий, входящая в организационную структуру Физтех-школы физики и исследований им. Ландау МФТИ (ЛФИ). 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 **6 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, осуществлён переход на новые стандарты обучения.

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 весеннем семестре 2022 года обучались: в бакалавриате (3 и 4 курсы) **14** студентов, в магистратуре (5 и 6 курсы) — **3** студента. В осеннем: в бакалавриате (4 курс) — **6** студентов, в магистратуре — **8** студентов.

Учебный процесс, а также сдача зачетов и экзаменов в обоих семестрах 2022 года проводились, как правило, в очном режиме. Все защиты — исключительно в очном режиме.

Общий учебный план кафедры

Занятия на кафедре 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 направ-



Занятия на кафедре проблем безопасного развития современных энергетических технологи

лениями исследований, проводимых в ИБРАЭ РАН. Это дает студентам возможность выбрать специализацию и научного руководителя.

На 4-м курсе студенты слушают шесть лекционных дисциплин, занимаются на семинаре по специальности и выполняют дипломную работу (выпускная квалификационная работа — ВКР), которую защищают по окончании 8-го семестра, после чего получают степень бакалавра.

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 10 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, учебных занятий не предусмотрено. По окончании 12-го семестра студенты защищают магистерскую диссертацию и получают степень магистра.

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.

Студенты кафедры имеют возможность одновременно с учебной работой в научных подразделениях ИБРАЭ РАН. Наиболее перспективные выпускники могут остаться работать в ИБРАЭ РАН, а также поступить в аспирантуру ИБРАЭ РАН или МФТИ.

Институт активно участвует в международном научном сотрудничестве, 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.э. 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 тепло-массообмена 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 быстроизменяющемся мире. Студенты, показавшие хорошую успеваемость, а также проявившие трудолюбие и ответственность, получают возможность трудоустройства в ИБРАЭ РАН с целью реализации своих профессиональных навыков в реальных, востребованных отраслях, проектах.



АСПИРАНТУРА

В настоящее время в Институте осуществляется подготовка аспирантов по следующим специальностям:

- **1.3.14.** Теплофизика и теоретическая теплотехника;
- **1.2.2.** Математическое моделирование, численные методы, комплексы программ;
- **2.4.9.** Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность;
- **2.4.10.** Техносферная безопасность в энергетике.

Форма обучения — очная.

Кандидаты сдают вступительные экзамены по английскому языку и специальности. Иногородним аспирантам предоставляется общежитие Российской академии наук. Аспиранты, обучающиеся на бюджетной основе, получают стипендию и могут работать в ИБРАЭ РАН в качестве научных сотрудников.

В 2022 году в аспирантуре ИБРАЭ РАН обучалось **23** аспиранта, среди которых — выпускники магистратуры базовой кафедры, а также выпускники МГУ, МИФИ, МЭИ и ряда других ведущих вузов России. В 2021 году аспирантуру закончили **5** аспирантов, **4** аспиранта остались работать в ИБРАЭ. Новый прием составил **4** человека, в числе которых — один выпускник МГУ им. М.В. Ломоносова.



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. Вплоть до конца 2022 года в Институте работал диссертационный совет Д 002.070.01 (действовавший 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**.

Примечание: с июня 2023 года в Институте работает диссертационный совет 24.1.496.01 (действующий на основании приказа Минобрнауки России от 22 июня 2023 г. № 1316/нк) по защите диссертаций на соискание кандидатских и докторских степеней по специальностям номенклатуры специальностей научных работников, утвержденной приказом Минобрнауки России от 13.01.2021 г. № 5.

2.4.9 – «Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность» (технические науки).

За период 1995—2022 гг. в Институте были успешно защищены **41** кандидатская и **12** докторских диссертаций по актуальным проблемам современной физики, теоретическим и практическим аспектам обеспечения безопасности атомной энергетики. Более **25%** 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 2022 году в Институте сотрудниками ИБРАЭ РАН были успешно защищены **5** кандидатских диссертаций.



ИЗДАТЕЛЬСКАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ

ИБРАЭ РАН активно ведет научно-издательскую деятельность. В рамках этой деятельности отдел информационных систем регулярно осуществляет выпуск печатных изданий — монографий и сборников научных трудов сотрудников Института, материалов и сборников докладов ежегодных конференций молодых ученых ИБРАЭ РАН, препринтов, внутриотраслевых отчетов, инструкций. С 2011 года ИБРАЭ РАН издает научный и информационно-аналитический журнал «Арктика: экология и экономика», а с 2017 года — научно-технический журнал «Радиоактивные отходы». Активно развивается интернет-портал Института (<http://ibrae.ac.ru>). В 2022 году его дополнили разделы, посвященные реализации национального проекта «Наука и университеты» и проведению мероприятий в рамках Десятилетия науки и технологий в Российской Федерации (2022—2031 гг.). Как следует из статистических данных, полученных с использованием сервисов Яндекс-метрика и Google Analytics, интерес к онлайн-ресурсам Института остаётся на стабильно высоком уровне. Количество визитов на сайт в период с 1 января 2022 года по 1 января 2023 года превысило **52500**; численность посетителей сайта в 2022 году достигла **33000** человек. Общее количество просмотров активных страниц сайта в период с 1 января 2022 года по 1 января 2023 года составило **147815** при средней глубине просмотра **2,82** 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 сборники научных трудов по основным направлениям деятельности Института, а также подготовленные при участии ИБРАЭ РАН Российские национальные доклады «Итоги и перспективы преодоления последствий чернобыльской аварии», сборники докладов научных конференций, научно-просветительские материалы по тематике обеспечения безопасности атомной энергетики.

В 2022 году Институтом подготовлено и издано **10** учебных пособий по компьютерным кодам нового поколения в рамках проведения V Школы-семинара по кодам нового поколения, разработанным в рамках проекта «Коды нового поколения» проектного направления «Прорыв».

Значительное место в научно-издательской деятельности Института занимает публикация препринтов научных трудов сотрудников ИБРАЭ РАН. С 1994 года издано более **300** препринтов, охватывающих все основные направления деятельности Института. В 2022 году опубликовано **3** препринта.

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

250 200

ПРОСМОТРОВ

**СУММАРНОЕ КОЛИЧЕСТВО
ЗА 2022 ГОД НА САЙТАХ
ИБРАЭ РАН И ВЫПУСКАЕМЫХ
НАУЧНЫХ ЖУРНАЛОВ**

ЖУРНАЛ «РАДИОАКТИВНЫЕ ОТХОДЫ»

Научно-технический журнал «Радиоактивные отходы» издается с 2017 года, его учредителем является ИБРАЭ РАН. Журнал «Радиоактивные отходы» — рецензируемое научное периодическое печатное издание, освещающее основные проблемы и достижения отечественной и зарубежной науки и техники в области безопасного обращения с радиоактивными отходами.

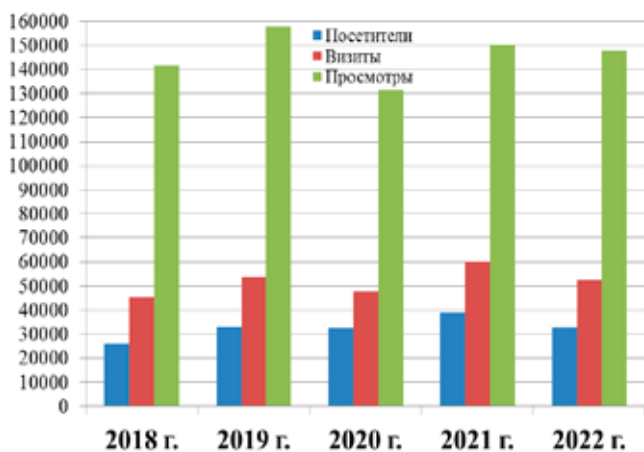
В 2022 г. основные усилия в работе редакции научно-технического журнала «Радиоактивные отходы» были направлены на решение основных задач, которые были сформулированы при его создании. Это консолидация статей по тематике обращения с радиоактивными отходами, вовлечение широкого круга специалистов и ученых к подготовке статей и представлении результатов выполненных работ, информирование специалистов и научных работников по вопросам обращения с радиоактивными отходами, в том числе о ходе выполнения работ в рамках создания Единой государственной системы обращения с радиоактивными отходами.

В 2022 году подготовлено и выпущено 4 номера журнала. В них опубликовано **39** научных статей, посвященных проблеме обращения с радиоактивными отходами, и **4** информационных обзора по зарубежным источникам, что составило **41%** от общего количества статей, опубликованных в 2022 году в основных российских периодических изданиях, представляющих материалы по данной тематике. Это несколько меньше, чем в предыдущем году, когда было опубликовано **45** статей и регулярно печаталась информация о наиболее значимых научных мероприятиях.

Авторами статей журнала в 2022 году явились **138** ученых и специалистов, среди которых около **70%** составили работники научных и проектных организаций, что свидетельствует об увеличении количества авторов, работающих непосредственно на предприятиях атомной отрасли. Среди авторов статей — **23** доктора наук и **48** кандидатов наук (**51,5%** от общего числа авторов). Средний индекс Хирша авторов составляет **8,8**.

Все опубликованные статьи в полнотекстовом формате размещены в электронной библиотеке РИНЦ. На основании сведений о публикационной активности журнала, представленным РИНЦ за 2021 год, двухлетний импакт-фактор РИНЦ журнала составляет **1,679**, а пятилетний — **1,224**. Значительно выросло число просмотров статей, опубликованных в журнале. В 2021 году оно составило **3954**, более чем в два раза превысив данные за 2019 год, что свидетельствует о возрастающем интересе читателей к материалам, публикуемым в журнале.

Это подтверждается и анализом посещений сайта журнала. В настоящее время на нем размещен 21 номер на русском языке и 18 номеров, переведенных на английский язык.



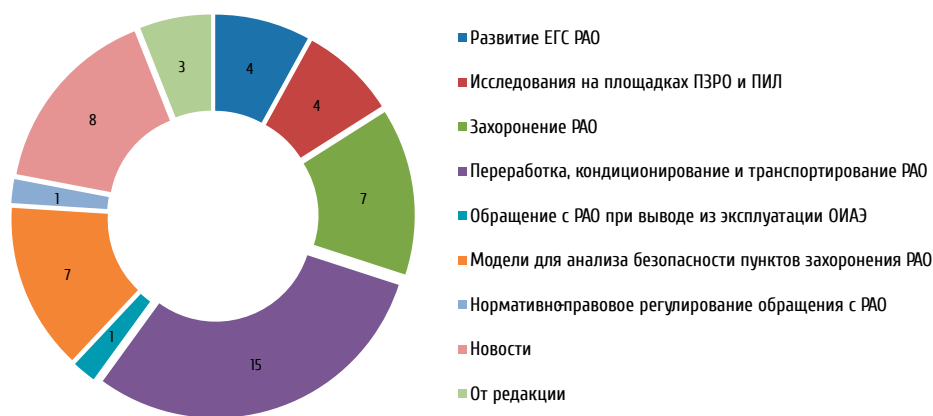
Посещаемость сайта журнала «Радиоактивные отходы»

39 665

ПРОСМОТРОВ

**ЗА 2022 ГОД НА САЙТЕ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО
ЖУРНАЛА «РАДИОАКТИВНЫЕ
ОТХОДЫ»**

<http://radwaste-journal.ru>



Распределение статей журнала «Радиоактивные отходы» по рубрикам в 2022 году

За 2022 год количество посетителей сайта (<https://radwaste-journal.ru>) составило **6192**, что на **47%** больше, чем в предыдущем году. Зарегистрировано **12322** визита, рост по сравнению с 2021 годом составил **67%** визитов, при этом количество просмотров материалов, размещенных на сайте журнала, выросло на **29%** и составило **39665**.

Всем опубликованным в журнале статьям присваивается цифровой идентификатор DOI.

Проведены **4** заочных заседания редколлегии журнала, в работе которых участвовало большинство ее членов (более **72%**).

В соответствии с поручениями редколлегии редакцией журнала усилена работа по рецензированию поступающих рукописей. К настоящему времени все статьи проходят рецензирование. В 2022 году в рецензировании материалов приняли участие **15** членов редколлегии.

В соответствии с приказом Минобрнауки России № 118 от 24.02.2021 г. об утверждении новой Номенклатуры научных специальностей подготовлен и направлен в ВАК комплект материалов о перерегистрации журнала в Перечне российских научных изданий, в которых допускается публикация основных результатов диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук.

ЖУРНАЛ «АРКТИКА: ЭКОЛОГИЯ И ЭКОНОМИКА»

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

Журнал «Арктика: экология и экономика» включен в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК (с декабря 2015 года), индексируется в РИНЦ, входит в ядро РИНЦ, включен в базу данных Russian Science Citation Index (RSCI) на платформе **Web of Science** (с 2018 года), в международную наукометрическую базу данных **SCOPUS**

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



Распределение статей журнала «Арктика: экология и экономика» по рубрикам в 2022 году

(с декабря 2020 года), в базу данных открытого доступа **DOAJ** (с 2019 года) и международную библиометрическую и реферативную базу данных **EBSCO** (с декабря 2019 года, база данных «Academic Search Ultimate»).

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

В конце 2021 года была подана заявка на включение журнала в международную наукометрическую базу данных Web of Science Core Collection; в настоящее время заявка находится в стадии рассмотрения.

В 2020 году в 4 выпусках журнала опубликовано **49** научных статей. В их подготовке приняли участие **136** ученых и специалистов, среди которых **6** академиков и членов-корреспондентов РАН, **24** доктора наук, **69** кандидатов наук (что составляет **72,8%** от общего числа авторов).

По данным РИНЦ за 2021 год, журнал в рейтинге SCIENCE INDEX занимает **236-е** место среди всех российских научных журналов (в 2020 г. журнал занимал **294-е** место в рейтинге) и **4-е место** по тематике «Комплексное изучение отдельных стран и регионов» (**1-е место** по значению двухлетнего и пятилетнего импакт-факторов по ядру РИНЦ); уточненный пятилетний импакт-фактор составляет **1,848** (**1,644** в 2020 г.), а двухлетний импакт-фактор — **2,533** (**1,921** в 2020 г.). По состоянию на январь 2022 года общее число цитирований журнала в РИНЦ — **6340**; количество цитирований в 2021 году составило **1020**.



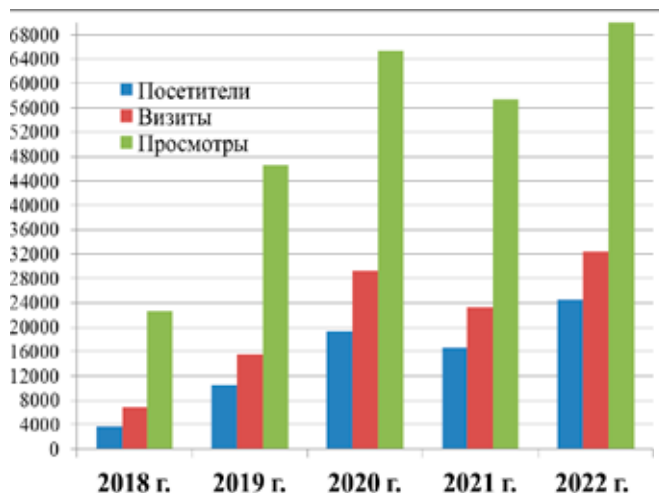
Журналы «Арктика: экология и экономика» за 2022 год

В СВОДНОМ РЕЙТИНГЕ RSCI НА ПЛАТФОРМЕ WEB OF SCIENCE ЖУРНАЛ «АРКТИКА: ЭКОЛОГИЯ И ЭКОНОМИКА» ВХОДИТ

В 1-Й КВАРТИЛЬ (82-Е МЕСТО В 2022 ГОДУ),

А ПО РАЗДЕЛУ «НАУКИ О ЗЕМЛЕ И ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ»

ЗАНИМАЕТ 10-Е МЕСТО



Посещаемость сайта журнала «Арктика: экология и экономика»

72 737

ПРОСМОТРОВ

ЗА 2022 ГОД НА САЙТЕ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО
ЖУРНАЛА «АРКТИКА:
ЭКОЛОГИЯ И ЭКОНОМИКА»,
ВЫПУСКАЕМОГО
ИБРАЭ РАН

<http://arctica-ac.ru>

вило **645** по сравнению с **562** в 2020 году. Количество просмотров статей на сайте РИНЦ (elibrary.ru) в 2021 году возросло на **23,5%** по сравнению с 2020 годом и составило **9320**.

В сводном рейтинге RSCI на платформе Web of Science (в него включено более **930** российских периодических научных изданий) журнал «Арктика: экология и экономика» входит в **1-й квартиль (82-е место в 2022 году)**, а по разделу «Науки о Земле и окружающей среде» (Earth and Related Environmental Sciences) занимает **10-е место**.

На конец 2022 года число цитирований статей журнала в международной наукометрической базе данных **SCOPUS** составило **186** с коэффициентом цитирования (**CiteScore**) равным **1,5**.

Постоянное 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 как в России, так и за рубежом.

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 2022 года по 1 января 2023 года возросло на **40%** по сравнению с аналогичным периодом 2021 года и превысило **32500**; число посетителей в 2022 году достигло **24500** человек, увеличившись на **47%** по сравнению с 2021 годом. Общее количество просмотров активных страниц сайта в период с 1 января 2022 года по 1 января 2023 года составило **72737** при средней глубине просмотра **2,24** страницы за визит.



Заседание Редакционной коллегии журнала «Арктика: экология и экономика»

Стабильный рост посещаемости сайта свидетельствует о высоком качестве научного материала журнала, актуальности и востребованности его контента, а также о формировании устойчивой целевой аудитории, в которую входит большое количество ученых и специалистов, область научных интересов которых тесно соотносится с тематикой журнала.

Включение журнала «Арктика: экология и экономика» в ведущие международные наукометрические и библиографические базы данных, наряду с участием в работе Редакционного совета журнала авторитетных зарубежных ученых, позволит 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»;
- «Арктика: экология и экономика»;
- «Атомная энергия»;
- «Вопросы радиационной безопасности»;
- «Известия РАН. Энергетика»;
- «Радиация и риск»;
- «Радиоактивные отходы»;
- «Энергия: экономика, техника, экология»;
- «Фундаментальная и прикладная гидрофизика».

ПОПУЛЯРИЗАЦИЯ НАУКИ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СО СМИ



Научный руководитель ИБРАЭ РАН Леонид Большов комментирует ситуацию вокруг Запорожской атомной станции, телеканал «Россия 24»

124 КОЛИЧЕСТВО ПУБЛИКАЦИЙ об ИБРАЭ РАН

в ФЕДЕРАЛЬНЫХ ПЕЧАТНЫХ И ИНТЕРНЕТ ИЗДАНИЯХ, ТЕЛЕ- И РАДИО СМИ ЗА 2022 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 г. был создан Совет молодых ученых и специалистов (СМУиС). Деятельность Совета осуществляется при активной поддержке администрации Института и лично академика РАН 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, культурно-познавательные и спортивные мероприятия.

2022 год охарактеризовался значительным ростом числа научной молодежи ИБРАЭ РАН, их количество превысило 30% от общего числа сотрудников Института.

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. В 2022 году в ходе проведения этих семинаров перед студентами выступили **27** лекторов, была широко освещена научная деятельность ИБРАЭ РАН. К июню 2022 г. многие из студентов определились с научными руководителями и тематикой своих дальнейших научных исследований.

Одной из основных задач Совета является стимулирование научной деятельности молодых ученых. В связи с этим СМУиС активно участвует в организации и проведении комплекса мероприятий, включающих в себя ежегодные Школу молодых ученых и Конкурс на лучшую научную работу молодых ученых ИБРАЭ РАН. В 2022 году в рамках проведения XXI школы молодых ученых ИБРАЭ РАН было представлено **30** докладов молодых ученых и специалистов ИБРАЭ, а также НИЯУ МИФИ, ИНП РАН, МФТИ, АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС», НИЦ «Курчатовский институт» по следующим секциям:



Конференция «XXI Школа молодых учёных ИБРАЭ РАН «Безопасность и риски в энергетике»

- Разработка вычислительных алгоритмов и расчетных кодов для обоснования безопасности АЭС.
- Верификация расчетных кодов, прикладные расчеты и экспериментальные исследования для обоснования безопасности АЭС и других объектов использования атомной энергии.
- Практические исследования и разработки в области ядерной и радиационной безопасности.
- Методическое и расчетное сопровождение решения задач обоснования и обеспечения безопасности при обращении с РАО, ОЯТ и ВЭ ядерно и радиационно опасных объектов.
- Экономические и социальные аспекты развития энергетики.

На Конкурс на лучшую научную работу молодых учёных ИБРАЭ РАН за 2022 год было представлено около **15** работ, большинство из которых получили высокую оценку конкурсной комиссии. По итогам конкурса присуждено два первых места, два вторых и три третьих. Торжественное награждение победителей и призеров конкурса денежными премиями и почётными грамотами состоялось на общем собрании Института 25 ноября 2022 года.

25—26 августа 2022 года при поддержке дирекции ИБРАЭ РАН молодые ученые в рамках технического тура посетили Объединенный институт ядерных исследований (г. Дубна). Одним из стимулов к этому стала проходившая в этот период XXV ежегодная научная школа молодых ученых «Липня», организатором которой является Объединение молодых ученых и специалистов ОИЯИ. Основные цели визита в ОИЯИ молодых ученых ИБРАЭ РАН заключались в ознакомлении с деятельностью лабораторий и реализуемыми проектами ОИЯИ, обсуждение возможного сотрудничества, а также налаживание связей между молодыми учеными двух Институтов. Участниками технического тура стали **27** человек, в число которых вошли призеры Школы молодых учёных ИБРАЭ РАН 2022 год и победители Конкурса на лучшую научную работу молодых учёных ИБРАЭ РАН за 2021 год.

В рамках участия во Всероссийском фестивале науки 2022 года СМУиС ИБРАЭ РАН подготовил и разместил на интернет-сайте Фестиваля видеоклип о работе ТКЦ ИБРАЭ РАН (https://festivalnauki.ru/media/video/189/151912/?sphrase_id=14325).

С декабря 2022 года организованы курсы по английскому языку для активной молодежи ИБРАЭ РАН (Academic nuclear English).

На протяжении 2022 года СМУиС информировал сотрудников Института о мероприятиях, конференциях и конкурсах, проводимых в атомной отрасли и институтах РАН.

Вся информация о Совете и проводимых им мероприятиях в течение года размещалась на официальном сайте ИБРАЭ РАН (<http://ibrae.ac.ru/contents/26/>) и информационном стенде Совета в помещении Института.



В августе 2022 года молодые ученые ИБРАЭ РАН в рамках технического тура посетили Объединенный институт ядерных исследований (г. Дубна)



Интеллектуальный турнир в ИБРАЭ РАН, 2022 г.



ПЕРВИЧНАЯ ПРОФСОЮЗНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ИБРАЭ РАН

На 1 января 2023 года численность членов местной профсоюзной организации Института (включая сотрудников ИБРАЭ РАН и АНО ЦАБ) составила **322** человека, сохраняя по этому показателю стабильность в течение ряда последних лет. Оперативное руководство осуществлялось Профкомом ИБРАЭ, в состав которого входили **9** сотрудников Института, в том числе представители научной молодежи.

Основные направления деятельности профсоюзного комитета ИБРАЭ в 2022 году традиционно фокусировались на обеспечении социальной защищенности работников Института и включали в себя: подготовку нового Коллективного договора между трудовым коллективом и администрацией, оказание адресной материальной помощи (в том числе на лечение), на детей, на путевки в лечебные учреждения (санатории); участие в мероприятиях вышестоящей организации — регионального отделения профсоюза работников РАН.

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**».



Спортивно-оздоровительный комплекс ИБРАЭ РАН



Тренировка по настольному теннису

Список сокращений

ATF (Advanced Technology Fuel) — ядерное топливо, устойчивое к нештатным ситуациям на АЭС («толерантное» топливо)

CUDA (Compute Unified Device Architecture) — программно-аппаратная архитектура параллельных вычислений

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

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

PLM — управление жизненным циклом (Product Lifecycle Management)

VUV — вакуумно-ультрафиолетовый диапазон электромагнитного спектра

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

АСК НДС — автоматизированная система контроля напряженно-деформированного состояния атомной радиации Организации Объединенных Наций

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)

БВ — бассейн выдержки

БД — база данных

БН — реактор на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем

БПЛА — беспилотный летательный аппарат

БР АСКРО — быстроразворачиваемая автоматизированная система контроля радиационной обстановки

ВАК — Высшая аттестационная комиссия при Министерстве науки и высшего образования РФ

ВВЭР — атомный реактор водо-водяного типа

ВК — вакуумная камера

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

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

ГНЦ РФ ТРИНИТИ — Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований»

ГНЦ РФ – ФЭИ — Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского (г. Обнинск)

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

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

ИАС — информационно-аналитическая система

ИВМ РАН — Институт вычислительной математики Российской академии наук

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

ИГМ СО РАН — Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук

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

ИИИ — источник ионизирующего излучения

ИНП РАН — Институт народнохозяйственного прогнозирования Российской Академии Наук

ИРМ — Институт реакторных материалов (г. Заречный, Свердловская обл.)

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

КН — решение Керра-Ньюмана уравнений Эйнштейна для чёрных дыр

КФ ВАО — короткоживущая фракция высокоактивных отходов

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

МАЭД — мощность амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения

МРКА-И1 — малогабаритный автономный программно-аппаратный модуль контроля радиационной обстановки

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

МФТИ — Московский физико-технический институт

МЭД — мощность экспозиционной дозы

НДС — напряженно-деформированное состояние

НИР — научно-исследовательские работы

НИОКР — научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы

НИЯУ МИФИ — Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (Московский инженерно-физический институт)

НЗХК — Новосибирский завод химконцентратов

НКДАР ООН — Научный комитет по действию атомной радиации Организации Объединенных Наций

НКМ — Нижнеканский массив горных пород

НК с ЯЭУ — надводный корабль с ядерной энергетической установкой

НПК ФГУП «Радон» — Научно-производственный комплекс (Сергиево-Посадский филиал) федерального государственного унитарного предприятия «Объединенный эколого-технологический и научно-исследовательский центр по обезвреживанию РАО и охране окружающей среды»

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»

ОНЯТ — объекты новой ядерной техники

ОТВС — отработавшая тепловыделяющая сборка

ОПС — окружающая природная среда

ОДЦ УГР — Опытно-демонстрационный центр вывода из эксплуатации уран-графитовых реакторов (г. Северск, Томская обл.)

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

ПГЗ ЖРО — пункт глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов

ПГЗРО — пункт глубинного захоронения радиоактивных отходов

ПДК — предельно допустимая концентрация

ПДХ — пункт длительного хранения

ПЗРО — пункт захоронения радиоактивных отходов

ПИЛ — подземная исследовательская лаборатория

ПКРВ — пассивный каталитический рекомбинатор водорода

ПКУ — программа комплексной утилизации

ПН — проектное направление

ПрЭВМ — программа для ЭВМ

ПС — программное средство

ПТК — программно-технический комплекс

ППРБ — программа повышения радиационной безопасности

РАО — радиоактивные отходы

РБ — радиационная безопасность

РБМК — реактор большой мощности канальный

РБН — реактор на быстрых нейтронах

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
 РФЯЦ ВНИИТФ — Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е. И. Забабахина (г. Снежинск)
 САОЗ НД — часть низкого давления системы аварийного охлаждения активной зоны
 САПР — система автоматизированного проектирования (CAD)
 СДР — структура декомпозиции работ
 СЗЗ — санитарно-защитная зона
 СК — суперкомпьютер
 КУ — система контроля и управления
 СМП — Стратегический мастер-план
 СМУиС — Совет молодых ученых и специалистов
 СНУП топливо — смешанное нитридное уран-плутониевое топливо
 СУБД — система управления базами данных;
 СУХТ — стеллажи уплотненного хранения топлива
 СПбО ИГЭ РАН — Санкт-Петербургский филиал Института геоэкологии РАН
 СХД — система хранения данных
 СХК — АО «Сибирский химический комбинат» (г. Северск)
 ТВС — тепловыделяющая сборка
 твэл — тепловыделяющий элемент
 ТЖМТ — тяжелый жидкометаллический теплоноситель
 ТК — топливный канал
 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
 ТЯЭС — термоядерная электростанция
 УТС — управляемый термоядерный синтез
 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
 ЭТВС — экспериментальная тепловыделяющая сборка
 ЯРБ — ядерная и радиационная безопасность
 ЯРОО — ядерно и радиационно опасный объект
 ЯТЦ — ядерный топливный цикл
 ЯЭУ — ядерная энергетическая установка

1

2

3

4

5

6

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