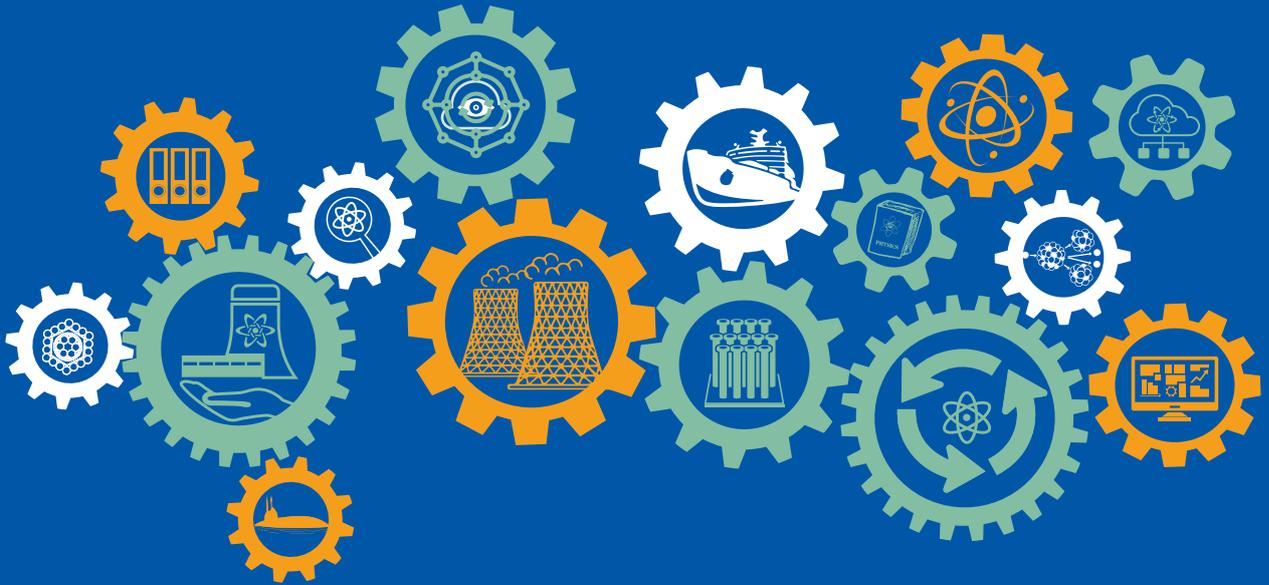




ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ БЕЗОПАСНОГО РАЗВИТИЯ
АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК



ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТ

за **2023** год

УДК 621.039

ББК 31.4

075

Основные результаты работ за 2023 г. / Под общ. ред. акад. РАН Л. А. Большова; Ин-т проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук (ИБРАЭ РАН). — М., 2023. — 102 с. : ил. — ISBN 978-5-907375-20-8.

Настоящий годовой отчет представляет собой обзор основных направлений научно-исследовательской и научно-организационной деятельности ИБРАЭ РАН за 2023 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 2023 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 978-5-907375-20-8



ИБРАЭ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ

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

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТ

за **2023** год



Большов Леонид Александрович

академик РАН,
научный руководитель ИБРАЭ РАН

Уважаемые читатели!

Вашему вниманию предлагается отчет ИБРАЭ РАН по результатам его деятельности в 2023 году.

Коллектив Института в истекшем году продемонстрировал высокий научный, творческий и организационный потенциал, вновь подтвердив свой статус ведущей в России научной и экспертной структуры в области решения фундаментальных проблем ядерной и радиационной безопасности объектов ядерного топливного цикла, стратегического планирования и обоснования мероприятий по обеспечению безопасности обращения с радиоактивными отходами, созданию и научно-технической поддержке российской системы радиационного мониторинга и аварийного реагирования на ЧС с радиационным фактором. Результаты работ сотрудников Института неоднократно были отмечены Президиумом РАН, руководством ГК «Росатом» и научной общественностью.

ИБРАЭ РАН проводит фундаментальные и прикладные исследования, создающие основу для решения проблем ядерной и радиационной безопасности и направленные на разработку методов, инструментария и проведение исследований безопасности АЭС, широко продвигает современный подход, ориентированный на цифровизацию решений в области комплексного планирования задач вывода из эксплуатации ОИАЭ и оптимизации обращения с РАО, осуществляет разработку и практическое внедрение линейки программных комплексов для решения задач ЗСЖЦ. Осуществляются разработка, валидация и аттестация интегральных расчетных кодов для моделирования различных режимов работы АЭС с реакторными установками ВВЭР и РБМК, а также кодов нового поколения для обоснования безопасности и достижения оптимальных технологических показателей в рамках реализации проектов и технологий проектного направления «Прорыв»

В 2023 году развивалось новое направление фундаментальных исследований — разработка аналитических и численных моделей окисления новых перспективных ATF-оболочек топливных элементов ядерных реакторов. Продолжились разработка и подготовка к валидации интегральной программы для ЭВМ СКАРТ-РИТМ, предназначенной для расчётного анализа тяжёлых аварий на атомных станциях малой мощности (АСММ) с реакторными установками «РИТМ–200»; успешно развивалась программа разработки компонентов цифровых двойников АЭС, в частности, интегральных расчетных математических моделей энергоблока с РУ БР-1200 и ОДЭК с РУ БРЕСТ-ОД-300; проводились исследования физических процессов перспективных нейтронных технологий.

В рамках федерального проекта «Разработка технологий управляемого термоядерного синтеза (УТС) и инновационных плазменных технологий», направленного на решение задач освоения термоядерной энергии, осуществлялись разработка и апробация инженерных физических моделей в составе интегральной программы для ЭВМ, предназначенной для расчётного анализа водородной взрывобезопасности в представительных авариях на термоядерных установках типа ИТЭР.

В 2023 году были значительно расширены функциональные возможности централизованной системы видеоконференцсвязи Института, реализована поддержка полностью удаленных решений, что обеспечило 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. Продолжились работы по развитию вычислительного кластера ИБРАЭ РАН, в результате которых он вошел в ТОП-25 суперкомпьютеров России.

Специалисты ИБРАЭ РАН в 2023 году приняли участие в целом ряде различных международных мероприятий, проводившихся в заочном и очном форматах как под эгидой МАГАТЭ, так и в рамках двустороннего сотрудничества в атомной отрасли. Активно работали наши образовательные структуры в МФТИ и МИФИ, развивается информационная и издательская база Института.

В настоящем отчете сделан акцент на фактически выполненных в 2023 году исследованиях и разработках, которые уже в текущем году будут внедрены в практику или продолжат дальнейшее совершенствование. Иными словами — на живых, развивающихся разработках, многие из которых являются уникальными.

Хочу поблагодарить всех сотрудников Института за проделанную работу и пожелать им новых успехов и достижений.

С уважением,



академик Л. А. Большов



Матвеев Леонид Владимирович

д.ф.-м.н.
директор ИБРАЭ РАН

Уважаемый читатель!

В данном отчете Вашему вниманию предлагаются основные результаты работы ИБРАЭ РАН за 2023 год.

В рамках проектного направления «Прорыв» были продолжены работы по развитию кодов нового поколения. В Новосибирском Филиале ИБРАЭ совместно со специалистами ИТ СО РАН выполнены эксперименты по изучению возможности плавления оболочек имитаторов твэла в свинцовом теплоносителе, а также по исследованию особенностей естественной циркуляции ТЖМТ во многопетловом циркуляционном контуре. Проведена доработка модуля SAFR в части, касающейся конверсии нитридного топлива в оксидное в свинцовом теплоносителе, и диссоциации нитридного топлива в жидком свинце.

С использованием ПрЭВМ СОКРАТ по заказу АО «Атомэнергопроект» в целях вероятностного анализа безопасности выполнены расчеты тяжелых аварий для энергоблоков Ростовской и Калининской АЭС.

Продолжены работы по созданию интегральной ПрЭВМ СКАРТ-РИТМ для анализа безопасности АСММ РИТМ-200: разработана архитектура кода, разработаны и имплементированы в единую кросс-платформенную ПрЭВМ ряд моделей физических процессов как для нормальных, так и для тяжелоаварийных условий, сформирован перечень валидируемых параметров, актуализированы верификационные матрицы.

В рамках обеспечения программно-методической базы для обоснования безопасности объектов ТЯУ типа ИТЭР определен перечень приоритетных физических моделей, требующих имплементации в интегральную ПрЭВМ для оценки водородной взрывобезопасности.

В 2023 году состоялся ввод системы управления данными и процессами расчётных и экспериментальных научных исследований «УРАНИЯ» в постоянную эксплуатацию у первого пользователя — интегрирующей структуры АО «Прорыв». В рамках ПН «Прорыв» продолжена разработка расчётных комплексов для решения оптимизационных задач (РКО). Успешно проведены приемочные испытания четырех РКО для решения задач оптимизации режимов эксплуатации РУ, нагрузок на трубопроводные системы, конструкции оборудования на основе его прочностных характеристик, а также для решения нейтронно-физических задач.

Получены новые важные результаты в задачах сквозного моделирования протекания и прогнозирования последствий тяжелых аварий на АЭС, связанные, в первую очередь, с развитием ансамблевого подхода, позволяющего учесть совокупность неопределенностей задачи. В развитие программного обеспечения отраслевой системы мониторинга радиационной обстановки заложено использование многовариантных расчётов на основе многолетних метеорологических рядов для учёта неопределённостей метеорологического фактора. С целью повышения эффективности противоаварийных тренировок и учений развиты подходы к имитационному моделированию радиационной обстановки на ОИАЭ. Разработан проект защищенного поста радиационного контроля для использования в труднодоступных местах и сложных климатических условиях.

Для решения радиоэкологических проблем Арктической зоны РФ разработана новая физическая модель переноса радионуклидов между приводным слоем атмосферы, снегом и морским льдом (АЛО).

Продолжены работы по развитию базы данных, организации и выполнению работ по повышению радиационной безопасности объектов РАН. По результатам работ принято решение о включении в указанную базу объектов высшей школы.

По итогам проведенного анализа IT-решений в области создания цифровых инструментов для задач планирования и оптимизации ВЭ и обращения с РАО определены приоритетные задачи на 2024—2025 гг.

С применением вновь созданных и ранее разработанных ЦИМ выполнены работы по обоснованию безопасности и оценкам стоимости работ по ВЭ для объектов ПАО «НЗХК» и АО «ОДЦ УГР». Созданы новые и актуализированы ранее разработанные цифровые инженерно-радиационные модели (ЦИРМ) для ряда объектов отрасли. К концу 2023 года общее количество созданных ЦИМ и ЦИРМ объектов превысило 120.

Важным новым направлением стало начало работ по созданию Информационно-аналитической системы планирования деятельности по ВЭ ЯРОО и обращению с РАО (ИАС РАО), включающие сквозное моделирование каждого процесса с момента образования РАО до передачи их на захоронение.

В рамках отработки технологий ВЭ на пилотной площадке Московского филиала ФГУП «РАДОН» проведены успешные испытания демонстрационных роботизированных комплексов отечественного производства. Выполнено комплексное обследование территории площадки. Развитый подход позволил обосновать оптимальную схему очистки РЗГ пилотной площадки.

Начаты работы по оценке массы, вида и класса РАО, приведённых к критериям приемлемости, обрзающихся при выводе из эксплуатации блоков АС для АО «Концерн Росэнергоатом». Продолжена работа по уточнению и совершенствованию классификации РАО, актуализации отраслевой Концепции вывода из эксплуатации ядерных установок, радиационных источников и пунктов хранения. В 2023 году начато строительство подземного комплекса ПИЛ. Активно продолжаются работы по исследованию геологической среды в районе расположения площадки.

На основе семейства расчетно-прогностических комплексов FENIA, RELTRAN, GeRa, KORIDA, MOUSE создан прототип и проведено тестирование первой версии информационно-аналитической системы для оценки долговременной радиационной и экологической безопасности с учётом особенностей различных видов объектов наследия.

По результатам работ по оценке радиационных и химических рисков в районах расположения предприятий Госкорпорации «Росатом» продемонстрирован пренебрежимо малый вклад радиационного фактора в общую структуру техногенного риска в городах Ангарске, Кирово-Чепецке и Нововоронеже.

Получены новые фундаментальные результаты в области разработки численных схем на основе балансно-характеристической схемы КАБАРЕ для моделирования в приближении мелкой воды нестационарного течения жидкости на произвольной топографии. Для анализа водородной взрывобезопасности при аварийных ситуациях в реакторе ИТЭР проведена адаптация математической модели процесса окисления бериллиевой пыли для ПрЭВМ CABARET-SC1.

Получила дальнейшее развитие асимптотическая модель переноса примеси в среде с крупномасштабными неоднородностями на случай адвекции-диффузии. Построена физическая модель, позволяющая описать распределение водорода, в том числе возможности его стратификации, в вакуумной камере ТЯУ типа ИТЭР в аварийных ситуациях. Разработана новая аналитическая модель высокотемпературного окисления перспективной ATF-оболочки на основе сплава FeCrAl. Предложена и исследована возможность применения изотопов бериллия и натрия в нейтрон-захватной терапии в качестве более безопасного и эффективного метода лечения отдельных видов злокачественных новообразований.

Как и прежде, особое внимание руководство ИБРАЭ уделяет развитию вычислительных и коммуникационных сетей Института. На конец 2023 г. вычислительный кластер ИБРАЭ РАН занимал 25 место в ТОП-50 суперкомпьютеров России.

Институт активно ведет международную, научно-образовательную и издательскую деятельность. В ИБРАЭ проводится обучение студентов на кафедрах МФТИ и НИЯУ МИФИ, работает Совет молодых ученых и специалистов. Научные и информационно-аналитические журналы «Арктика: экология и экономика» и «Радиоактивные отходы», учредителем и издателем которых является ИБРАЭ РАН, занимают высокие места в рейтинге научных журналов РИНЦ и индексируются в ведущих международных наукометрических базах данных; стабильно растет посещаемость интернет-ресурсов Института.

Далее в отчёте представлены основные результаты работ за 2023 год, структурированные по направлениям.

Директор ИБРАЭ РАН
Доктор физико-математических наук



Л. В. Матвеев

Содержание



1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ИБРАЭ РАН	8
Коллектив и структура Института в 2023 году	9
Направления научно-исследовательской деятельности Института	12
2. ОСНОВНЫЕ ИТОГИ РАБОТ В 2023 ГОДУ	14
2.1. БЕЗОПАСНОСТЬ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ	15
Разработка программного обеспечения для анализа безопасности атомных станций	15
Анализ безопасности ядерных энергетических установок	16
Расчетно-экспериментальные исследования теплофизических процессов в ядерных установках	20
Информационные технологии управления жизненным циклом объектов атомной энергетики.....	25
2.2. БЕЗОПАСНОСТЬ ЗАВЕРШАЮЩИХ СТАДИЙ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ОБЪЕКТОВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ И НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ	29
Информационная поддержка разработки и реализации программ в сфере ЯРБ	29
Научное обеспечение завершающей стадии жизненного цикла объектов ядерной техники	40
Стратегическое планирование и проектное управление в области радиационной безопасности	49
2.3. БЕЗОПАСНОСТЬ НАСЕЛЕНИЯ	54
Развитие систем радиационного мониторинга, аварийной готовности и реагирования.....	54
2.4. РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ	61



Численные методы и вычислительные алгоритмы.....	61
Теоретическая физика	69
3. РАЗВИТИЕ ИНФРАСТРУКТУРЫ	79
4. МЕЖДУНАРОДНОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО	81
5. НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ И ИЗДАТЕЛЬСКАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ.....	88
Профильные кафедры.....	88
Кафедра проблем безопасного развития современных энергетических технологий МФТИ	88
Кафедра «Технологии замкнутого ядерного топливного цикла» НИЯУ МИФИ.....	93
Аспирантура.....	92
Диссертационный совет.....	92
Издательская деятельность	93
Журнал «Радиоактивные отходы»	94
Журнал «Арктика: экология и экономика»	96
Участие ученых Института в работе научных Советов по проблемам безопасности в области энергетики и редакционных коллегий научных журналов	98
Популяризация науки и взаимодействие со СМИ	98
6. ОБЩЕСТВЕННЫЕ ОРГАНИЗАЦИИ.....	99
Совет молодых ученых и специалистов.....	99
Первичная профсоюзная организация ИБРАЭ РАН.....	101
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	102

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—2023 годах ИБРАЭ РАН неизменно входил в первую категорию научных организаций.



КОЛЛЕКТИВ И СТРУКТУРА ИНСТИТУТА В 2023 ГОДУ

По состоянию на 1 января 2024 года общая штатная численность ИБРАЭ РАН составляла **551** человек, в том числе **418** сотрудников научных подразделений. Среди них: **3** академика РАН, **1** член-корреспондент РАН, **40** докторов наук и **106** кандидатов 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 Красноярском филиале ИБРАЭ РАН (г. Железнодорожск) работало **7** научных сотрудников, в том числе **2** кандидата наук.

В структуре Института можно выделить три блока подразделений:

- Блок подразделений исследователей и разработчиков.
- Блок подразделений финансового, кадрового и технического обеспечения.
- Блок подразделений научно-организационного обеспечения и международного сотрудничества.

418

СОТРУДНИКОВ НАУЧНЫХ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ, СРЕДИ НИХ:

3

АКАДЕМИКА РАН

1

ЧЛЕН-КОРРЕСПОНДЕНТ РАН

40

ДОКТОРОВ НАУК

106

КАНДИДАТОВ НАУК



Заместитель директора
по экономике
и финансам

О. В. Цацулина

ovts@ibrae.ac.ru

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 25 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 структуре российской науки кризисным центром решающим полный перечень задач по обеспечению научно-технической и экспертной поддержки системы аварийного реагирования при нештатных/чрезвычайных ситуациях с радиационным фактором: от анализа и оценки аварийных технологических процессов на ОИАЭ до разработки рекомендаций для органов власти 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

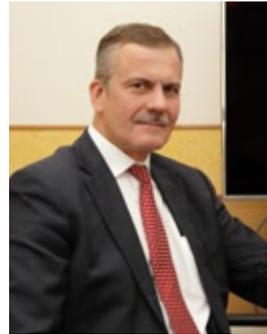
Контактная служба вместе с договорным, финансовым и юридическим отделами в 2023 году обеспечили участие Института в более чем 40 конкурсных процедурах, заключено более 30 контрактов с заказчиками на выполнение работ (НИР, НИОКР и др.), а также проведено порядка 150 конкурентных процедур на оказание услуг, закупку оборудования и материалов.

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



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)

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.

В 2023 году ИБРАЭ РАН осуществлял научно-исследовательскую и организационную деятельность в следующих основных направлениях:



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.

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

- разработка физико-математических моделей, 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;
- разработка вычислительных алгоритмов нового поколения для задач геофизической гидродинамики;
- 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;
- теоретическое и расчетное исследование окисления бериллиевой пыли в вакуумной камере термоядерного реактора ИТЭР при авариях;
- разработка аналитических и численных моделей окисления новых перспективных ATF-оболочек ядерных реакторов;
- фундаментальные исследования в области теории элементарных частиц и низкоэнергетической ядерной физики.;

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

- разработка, валидация и аттестация интегральных расчетных кодов для моделирования различных режимов работы АЭС с РУ 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;

- развитие и научно-методическая поддержка использования интегральной ПрЭВМ СОКРАТ в практике детерминистического анализа тяжёлых аварий на АЭС с РУ ВВЭР и БН, а также разработка и валидация интегральной ПрЭВМ СКАРТ-РИТМ для анализа тяжёлых аварий на АСММ с РУ РИТМ-200Н;
- разработка и апробация инженерных физических моделей в составе интегральной ПрЭВМ для расчётного анализа водородной взрывобезопасности в представительных авариях на термоядерных установках типа ИТЭР;
- участие в выполнении 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»;
- 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, включая технологии проведения виртуальных испытаний изделий.

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

- создание цифровых инструментов для задач планирования и оптимизации ВЭ и обращения с РАО;
- разработка и оптимизация технических решений по ВЭ ОИАЭ и обращению с РАО;
- нормативно-методическая поддержка планирования и реализации мероприятий в сфере ЗСЖЦ;
- безопасность термоядерных и гибридных систем и развитие нормативной базы;
- методическое и нормативное обеспечение мероприятий в сфере ЗСЖЦ;
- мониторинг эффективности реализации ФЦП ЯРБ-2 и обеспечение публичности мероприятий;
- обоснование безопасности захоронения РАО;
- разработка и применение расчётно-методического инструментария оценки безопасности объектов ЯТЦ;
- обоснование радиационной безопасности при реабилитации территорий;
- 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;
- развитие средств и методов моделирования мощности дозы и отклика средств измерений, используемых для радиационного мониторинга;
- разработка информационных систем и программно-технических комплексов для оценки, анализа и прогноза радиационных последствий нештатных/чрезвычайных 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.

35-ЛЕТНИЙ ЮБИЛЕЙ ИБРАЭ РАН

3 ноября 2023 года исполнилось 35 лет со дня выхода Распоряжения Совета Министров СССР от 3 ноября 1988 г. № 2198р, в соответствии с которым был создан Институт проблем безопасного развития атомной энергетики АН СССР, ставший впоследствии ИБРАЭ РАН. В ознаменование этой исторической даты администрацией ИБРАЭ были организованы научная конференция и юбилейный вечер для сотрудников Института, которые проводились в Российской академии наук на Воробьевых горах.

Конференцию открыл научный руководитель ИБРАЭ РАН академик Леонид Александрович Большов, кратко рассказавший об основных вехах на пути развития Института.

Затем с докладом «Будущее института создается сегодня», посвященным вопросам подготовки молодых научных кадров, выступил директор ИБРАЭ РАН, д.ф.-м.н. Л. В. Матвеев.

С 35 летием Института всех поздравили директор Новосибирского филиала ИБРАЭ РАН Н.А. Прибатурин, зам. директора В.Ф. Стрижов, О.В. Цацулина и И. И. Линге, который в своем выступлении основной акцент сделал на истории становления ключевых направлений деятельности Института.

В завершение конференции руководители ряда ведущих научных подразделений ИБРАЭ выступили с докладами, в которых представили свое видение перспективных направлений будущих исследований:

- к.т.н. К. С. Долганов «Перспективы по направлению «Анализ безопасности АЭС»
- д.т.н. С.С. Уткин «Видение будущего основных направлений исследований»
- С. Н. Красноперов «Направления развития систем радиационного мониторинга и научно-технической поддержки систем аварийной готовности на нештатные/чрезвычайные ситуации с радиационным фактором»
- С.В. Сумароков «О будущих направлениях исследований и разработок отдела проблем управления жизненным циклом объектов атомной энергетики ИБРАЭ РАН».



Научная конференция, посвященная 35-летию Института, РАН, ноябрь 2023 года

2

Основные итоги работ научных подразделений ИБРАЭ РАН



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)

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 ЭНЕРГОБЛОКА 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



АНАЛИЗ БЕЗОПАСНОСТИ ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК



**НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ
НАПРАВЛЕНИЯ**

Научный руководитель
ИБРАЭ РАН

Л. А. Большов

академик РАН
(bolshov@ibrae.ac.ru)



Заведующий
отделением

А. Е. Киселев

д.т.н.
(ksv@ibrae.ac.ru)

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

- 1 РАЗВИТИЕ И НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ПОДДЕРЖКА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ СОКРАТ В ПРАКТИКЕ ДЕТЕРМИНИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ТЯЖЁЛЫХ АВАРИЙ НА АЭС С РЕАКТОРНЫМИ УСТАНОВКАМИ ВВЭР И БН, А ТАКЖЕ РАЗРАБОТКА И ВАЛИДАЦИЯ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ СКАРТ-РИТМ ДЛЯ АНАЛИЗА ТЯЖЁЛЫХ АВАРИЙ НА АСММ С РЕАКТОРНЫМИ УСТАНОВКАМИ РИТМ-200Н
- 2 РАЗРАБОТКА И АПРОБАЦИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ В СОСТАВЕ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ, ПРЕДНАЗНАЧЕННОЙ ДЛЯ РАСЧЁТНОГО АНАЛИЗА ВОДОРОДНОЙ ВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТИ В ПРЕДСТАВИТЕЛЬНЫХ АВАРИЯХ НА ТЕРМОЯДЕРНЫХ УСТАНОВКАХ ТИПА ИТЭР
- 3 ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ТЯЖЁЛЫХ АВАРИЙ НА АЭС С РЕАКТОРАМИ ВВЭР И БН В РАМКАХ ОБОСНОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ АЭС
- 4 НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ РАБОТ ПО РАСЧЁТНОМУ АНАЛИЗУ БЕЗОПАСНОСТИ АЭС ПРИ ТЯЖЁЛЫХ АВАРИЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА СОКРАТ, ВКЛЮЧАЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С ЗАРУБЕЖНЫМИ ЗАКАЗЧИКАМИ ПРИ ЭКСПЕРТИЗАХ ДОКУМЕНТАЦИИ СОКРАТ И РЕЗУЛЬТАТОВ АНАЛИЗА ТЯЖЁЛЫХ АВАРИЙ
- 5 УЧАСТИЕ В ВЫПОЛНЕНИИ 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»
- 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 2023 ГОДА

С использованием ПрЭВМ СОКРАТ выполнены детерминистические расчёты тяжёлых аварий в поддержку вероятностного анализа безопасности второго уровня для энергоблока 3 Ростовской АЭС и энергоблока 1 Калининской АЭС (заказчик АО «Атомэнергопроект»).

В рамках апробации ранее разработанного методического подхода к учету погрешностей и неопределённостей при расчётном анализе запроектных аварий на АЭС с РУ ВВЭР выполнены массовые расчёты тяжёлых аварий, включающие анализ 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, выполняемой специалистами АО «ВНИИАЭС» при помощи CFD-моделей.

В рамках подготовки к выполнению этапа 1 работ по расчётно-аналитическому обоснованию системы удержания расплава и охлаждения корпуса реактора (СУРОК) выполнены валидационные расчёты экспериментов с кризисом теплообмена на обращённых вниз пластинах, обсуждены вопросы реализации проекта СУРОК на реакторной установке ВВЭР-С в ходе совместных технических совещаний специалистов ОКБ «ГИДРОПРЕСС», ГК «Росатом», Кольской АЭС, АО «Атомэнергопроект», НИЦ «Курчатовский институт» и ИБРАЭ РАН.

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.

В продолжение НИР «Разработка технического задания и проведение исследований в поддержку создания программы для ЭВМ для анализа безопасности АСММ с РУ РИТМ-200 при тяжёлых авариях» 2021 г. и в рамках второго этапа НИР «Разработка и верификация программы для ЭВМ для анализа безопасности АСММ с РУ РИТМ-200 при тяжёлых авариях» 2022—2026 гг. решены следующие задачи в области разработки интегральной ПрЭВМ СКАРТ-РИТМ:

- непрерывно выполняется расчётная поддержка программы экспериментов по исследованию деградации активной зоны РУ РИТМ-200 в режимах, имитирующих условия тяжёлой аварии; ведётся консультирование экспериментаторов в части выбора исследуемых образцов, системы измерений и режимных параметров испытаний;
- актуализированы матрицы верификации и валидации основных расчётных модулей (контурной теплогидравлики и деградации активной зоны) ПрЭВМ и сформирован перечень валидируемых параметров;
- разработана архитектура ПрЭВМ;
- разработаны модели контурной теплогидравлики, описывающие поведение двухфазного теплоносителя в диапазоне режимов от нормальной эксплуатации до тяжёлой аварии;
- разработаны модели деградации активной зоны, описывающие начальную стадию тяжёлой аварии (окисление элементов активной зоны, образование и движение расплава);
- разработанные модели имплементированы в единую кросс-платформенную ПрЭВМ, для которой проведено тестирование на ОС Windows, Astra Linux и КВУ ИБРАЭ РАН;
- выполнена верификация моделей контурной теплогидравлики на наборе аналитических тестов.



Рис. 2.1.1 – К.С. Долганов на XVI Международной конференции «Забабахинские научные чтения – 2023»

Совместно с ЦНТП ИБРАЭ РАН был выполнен заключительный 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 результате данной работы был создан прототип системы сквозного моделирования и успешно выполнены её испытания на полномасштабной реальной задаче (гипотетической тяжёлой аварии на АЭС с РУ ВВЭР-1000). Кроме того, для основных структурных элементов системы сквозного моделирования были проведены верификация и валидация.

С целью обеспечения программно-методической базы для обоснования безопасности объектов типа ИТЭР определён перечень приоритетных физических моделей, требующих имплементации в интегральную ПрЭВМ для расчёта источников водорода и инженерной оценки водородной взрывобезопасности на ТЯУ типа ИТЭР. В рамках оценки применимости базовых теплогидравлических моделей ПрЭВМ СОКРАТ в условиях аварий на ТЯУ выполнены кросс-верификационные расчёты представительных аварий типа LOCA и LOVA на ИТЭР и показано хорошее согласие полученных результатов с референтными результатами, полученными по программам MELCOR и ATHENA. На примере анализа аварии LOVA проработан переход к применению методик анализа неопределённости и чувствительности, изначально разработанных для анализа запроектных аварий на традиционных РУ.

В рамках выполнения НИР «Создание новых поколений вычислительных алгоритмов, моделей и программных средств для инновационных ядерных и термоядерных энерго-технологий и ядерного топливного цикла» проведён расчётный анализ эффективности комбинированных мер по управлению тяжёлой аварией на энергоблоке с ВВЭР-1000, включающих повторных залив активной зоны водой и включение спринклерной системы. Показано, что использование спринклерной системы во время повторного залива перегретой активной зоны может приводить к более тяжёлым последствиям, чем последствия, возникающие при отсутствии повторного залива.

В рамках международных проектов выполнен следующий комплекс работ:

- В рамках координационного исследовательского проекта МАГАТЭ CRP I31033, посвящённого совершенствованию практического применения методологий неопределённости и чувствительности для анализа тяжёлых аварий на водоохлаждаемых реакторах, в 2023 году сотрудниками ИБРАЭ был подготовлен проект TECDOC, обобщающий результаты моделирования тяжёлых аварий на РУ ВВЭР-1000, и направлен в МАГАТЭ для рецензирования. Результаты были представлены на пятом координационном совещании, которое прошло он-лайн с 5 по 8 декабря 2023.
- В рамках международного координационного проекта МАГАТЭ ATF-TS выполнено численное моделирование интегральных экспериментов DEGREE-B3 (CRIEPI, Япония) и CODEX-ATF (CER, Венгрия) по разогреву, окислению паром и охлаждению пучков имитаторов твэлов с оболочками из циркониевых сплавов, плакированных слоем хрома, а также расчёты экспериментов с раздутием и разрывом отрезков хромированных циркониевых оболочек внутренним давлением.
- В рамках взаимодействия в рабочей группе МАГАТЭ, посвящённой проблемам тяжёлых аварий на РУ с жидкометаллическим теплоносителем «Technical Meeting on the Safety Approach for Liquid Metal Cooled Fast Reactors and the Analysis and Modelling of Severe Accident», ведётся работа над созданием технического документа (TECDOC) «Analysis and Modelling of Severe Accidents for Liquid Metal Fast Reactors».

КЛЮЧЕВЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАБОТ

1. К.С. Долганов, А.Е. Тарасов, А.В. Капустин, Д.Ю. Томащик. Расчетное исследование раздутия и разрыва оболочек твэлов ВВЭР и PWR в экспериментах с различными условиями нагружения // Известия РАН. Энергетика, 2023, — № 3, — С. 57–78.
2. И.С. Ахмедов, Т.А. Юдина, Д.Ю. Томащик, К.С. Долганов, М.Ф. Филиппов. Квалификационный анализ экспериментальных данных по высокотемпературному окислению в паре отечественных сплавов на основе циркония // Известия РАН. Энергетика, 2023, — № 3, — С. 3–17.
3. А.Д. Васильев, К.С. Долганов, А.Е. Киселёв, П.С. Кондратенко, Л.В. Матвеев, В.Н. Семёнов. Возможность стратификации водорода в условиях аварии с истечением теплоносителя из системы охлаждения в вакуумную камеру токамака // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, т. 46 — вып. 2. — С. 72—86. Vasiliev, A.D., Dolganov, K.S., Kiselev, A.E., Matveev, L.V., Semenov, V.N. Possibility Of Hydrogen Stratification Under Accident Conditions With Coolant Loss From The Cooling System Into Vacuum Vessel At Tokamaks // Problems of Atomic Science and Technology, Series Thermonuclear Fusion, 2023, 46(2), pp. 72–86.
4. И.С. Ахмедов, Н.И. Рыжов, Т.А. Юдина, К.С. Долганов, А.Е. Киселев. Анализ аварии с потерей вакуума на ИТЭР с использованием интегральной программы для ЭВМ СОКРАТ-B1/B2 // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, т. 46, — вып. 2. — С. 72—86. Akhmedov, I.S., Ryzhov, N.I., Yudina, T.A., Dolganov, K.S., Kiselev, A.E. Analysis of Loss of Vacuum Accident at ITER Using Socrat-VI/V2 / Problems of Atomic Science and Technology, Series Thermonuclear Fusion, 2023, 46(2), pp. 38—52.
5. F. Mascari, A. Bersano, F. Alcaro, M. Stempniewicz, L. Albright, T. Jevremovic, N. Andrews, R Gauntt, H. Austregesilo, S. Buchholz, A. Bellomo, F. D'Auria, G. Di Palma, M. Lanfredini, G. Spina, C. Bertani, M. De Salve, N. Falcone, D.Y. Tomashchik, OECD/NEA/CSNI/WGAMA PERSEO benchmark: Main outcomes and conclusions // Nuclear Engineering and Design, 405 (2023) 112220. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2023.112220>.
6. Dolganov, K.S. Possibility of misleading readings of water level in VVER steam generator during severe accidents with account for the Fukushima lessons // Nuclear Engineering and Design, 2023, 413, 112519.
7. N.I. Ryzhov, K.S. Dolganov, Yu.A. Zvonarev, A.E. Kiselev, N.A. Kozlova, I.A. Melnikov, D.Yu. Tomashchik, M.F. Philippov, R.V. Chalyu, S.A. Shevchenko, T.A. Yudina, D.A. Yashnikov // Evaluation of uncertainties associated with best estimates of parameters in the deterministic analysis of a severe accident // Nuclear Engineering and Design 415 (2023) 112741 <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2023.112741>.



РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЯДЕРНЫХ УСТАНОВКАХ

НОВОСИБИРСКИЙ ФИЛИАЛ ИБРАЭ РАН



Директор филиала

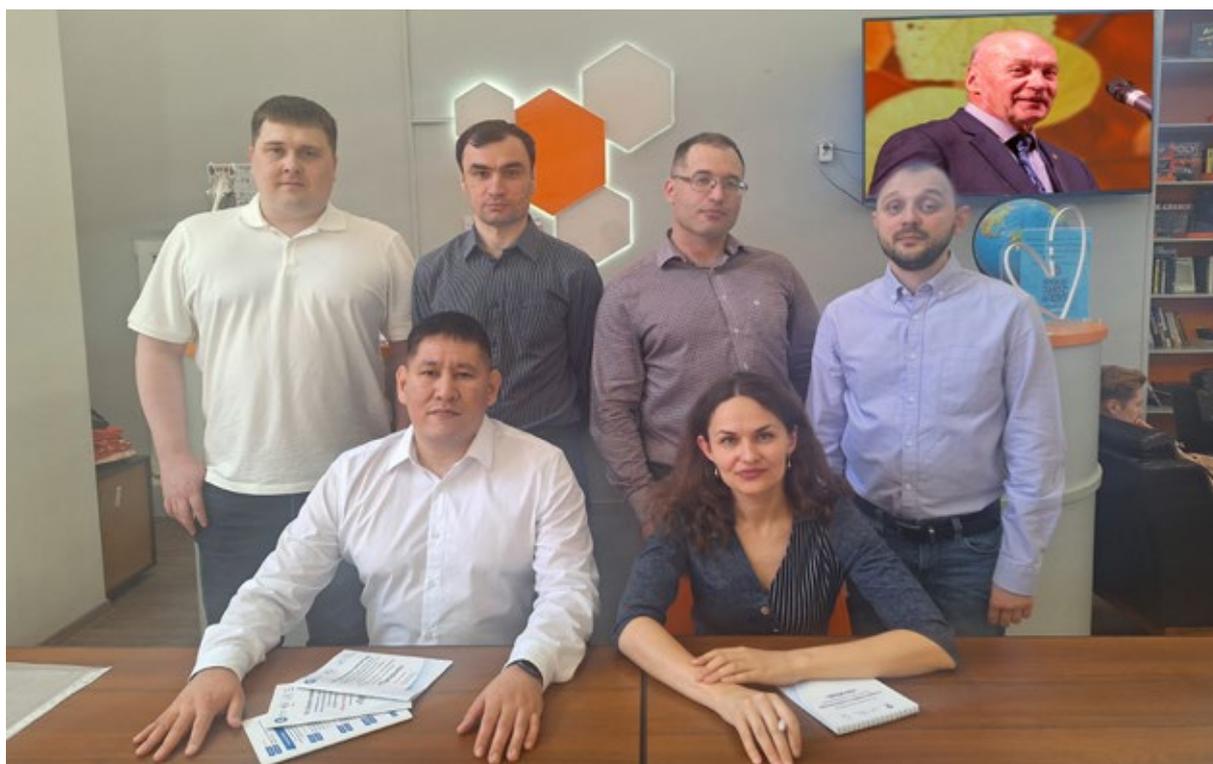
Н. А. Прибатурин

чл.-корр. РАН

(nialp@ibrae.ac.ru)

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 2023 ГОДА

1. Совместно со специалистами ИТ СО РАН впервые выполнены **эксперименты по изучению возможности плавления металлической оболочки имитатора твэла одно- и семистержневой моделей ТВС в свинцовом теплоносителе.** Были использованы имитаторы твэла внешним диаметром 10 мм и толщиной стенки 1 мм, изготовленные из нержавеющей стали 08Х18Н10. Имитаторы твэлов в многостержневой модели ТВС были расположены гексагонально с относительным шагом 1,4 и соответствовали расположению твэлов в ТВС РУ БРЕСТ ОД-300. Внутренний свободный объём моделей ТВС заполнялся расплавленным свинцом. Конструкция однотвэльной и 7-твэльной моделей ТВС показана на рис. 2.1.2. Разогрев имитатора твэла осуществлялся за счет подвода электрического тока через вольфрамовый сердечник 3, его диаметр составлял 3 мм.

В ходе эксперимента выполнялись измерения температуры вблизи металлической оболочки имитатора твэла и температуры внешнего теплоизолирующего корпуса, окружающего модели ТВС, и определялось местоположение начала плавления металлической оболочки имитатора твэла.

На рис. 2.1.3 приведена типичная временная зависимость изменений мощности нагрева, температуры внешней стенки имитатора твэла, температуры свинца при разогреве 7-стержневой модели ТВС. Разрушение оболочки имитатора твэла всегда наблюдалось при достижении температуры, равной температуре плавления используемого материала. Момент плавления оболочки имитатора определялся по резкому изменению подводимой электрической мощности. Последующее после этого уменьшение мощности нагрева приводило к охлаждению свинца.

На рис. 2.1.4 показаны типичный вид верхней торцевой поверхности 7-стержневой модели ТВС в момент разогрева и осевой разрез модели после прекращения измерений и ее охлаждения.

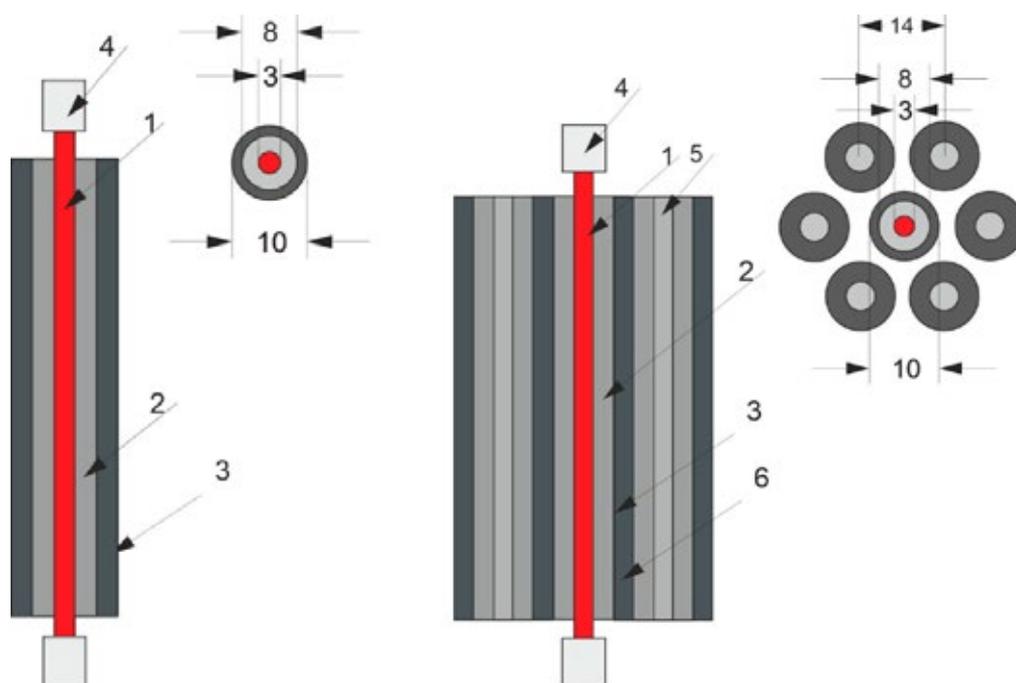


Рис. 2.1.2 — Схема одно- и семистержневых моделей ТВС.

1 — вольфрамовый сердечник, 2, 6 — порошок, 3 — внешняя поверхность имитатора твэла, 4 — танталовые токовводы, 5 — необогреваемый сердечник

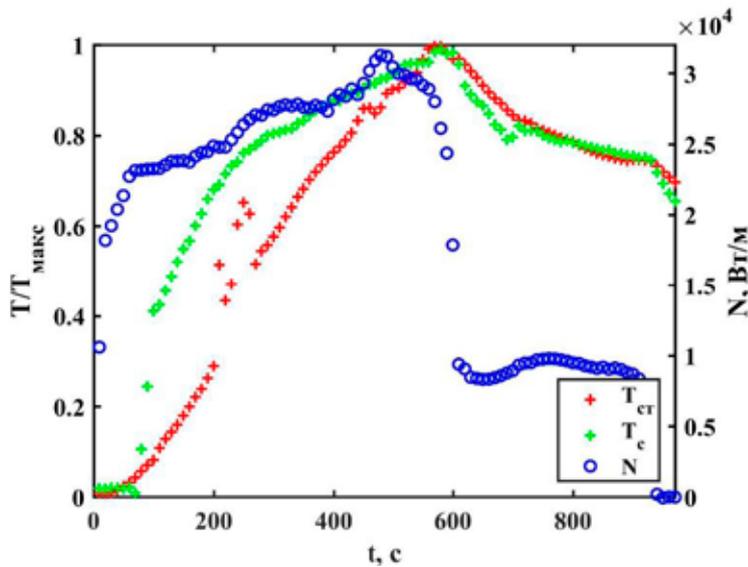


Рис. 2.1.3 — Изменение мощности N и температуры внешней стенки имитатора твэла $T_{\text{ст}}$ и температуры свинца T_c при разогреве 7-стержневой модели ТВС



Рис. 2.1.4 — Вид рабочего участка 7-стержневой модели ТВС и финишного состояния верхнего торца ТВС

Экспериментально установлена хорошая повторяемость результатов. Полученные экспериментальные данные могут быть использованы для оценки происходящих процессов и верификации расчетных модулей теплогидравлических кодов.

2. Совместно со специалистами ИТ СО РАН исследованы **особенности развития естественной циркуляции ТЖМТ** (свинцово-висмутовой расплава) на многопетлевом циркуляционном контуре (рис. 2.1.5). Контур имеет четыре циркуляционные петли, соединенных в верхней камере–баке, источник тепловыделения в виде имитатора ТВС и четыре теплообменника, отводящие тепло. Схема и общий вид стенда представлены на рис. 2.1.5. Каждая циркуляционная петля в контуре была замкнута и включала вертикальный и горизонтальный участки. Все циркуляционные петли подсоединялись к одному источнику тепловыделения. Нагрев теплоносителя осуществлялся при помощи семи имитаторов твэла внешним диаметром 10 мм и длиной 0,5 м, расположенных в гексагональной компоновке с относительным шагом 1,4 между центрами стержней. Все составляющие элементы стенда были термоизолированы и поддерживались при постоянной температуре. Для этого использовалась обратная связь между индивидуальными нагревателями, установленными на каждом элементе стенда, и соответствующими термopарами, контролирующими температуру поверхностей элементов стенда.

Выполнен блок тестов с измерениями температур, скорости теплоносителя для двух- и четырехпетлевых систем циркуляции при различных уровнях тепловыделения. В результате экспериментов получены детальные данные о временных распределениях температуры



Рис. 2.1.5 – Схема четырехпетлевого циркуляционного стенда для изучения естественной циркуляции и общий вид стенда. 1 – модель-имитатор ТВС; 2 – восходящая линия; 3 – верхний бак; 4 – теплообменники; 5 – нисходящие петли; 6 – участки для подключения измерительных систем; 7 – горизонтальные участки; 8 – измерители-регуляторы ТРМ-138; 9 – контроллеры; 10 – система управляемых реле; 11, 12 – баки с теплоносителем второго контура

теплоносителя на входе и выходе имитатора ТВС, входах и выходах теплообменников, и температуры каналов используемых циркуляционных контуров.

На рис. 2.1.6а в качестве примера представлена устойчивая циркуляция теплоносителя в четырехпетлевой циркуляционной системе. Здесь приведены изменения температуры на входе и выходе модели имитаторе ТВС. Температуры теплоносителя на четырех входах в модель-имитатор ТВС находились в пределах 170—175°C. Разница температур на входе и выходе в имитатор ТВС составляла порядка 30°C. На рис. 2.1.6б приведена мощность, снимаемая на четырех теплообменниках, вместе с суммарной подводимой мощностью.

Данные всех тестов были сведены в таблицу, где для каждого теста указано 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.

3. Проведена **доработка тяжелоаварийного модуля SAFR** в части, касающейся конверсии нитридного топлива в оксидное в свинцовом теплоносителе, а также диссоциации нитридного топлива в жидком свинце. По результатам доработок проведены расчеты эксперимента BR-4(3) на установке «Расплав-3» по исследованию устойчивости UN топлива в расплаве

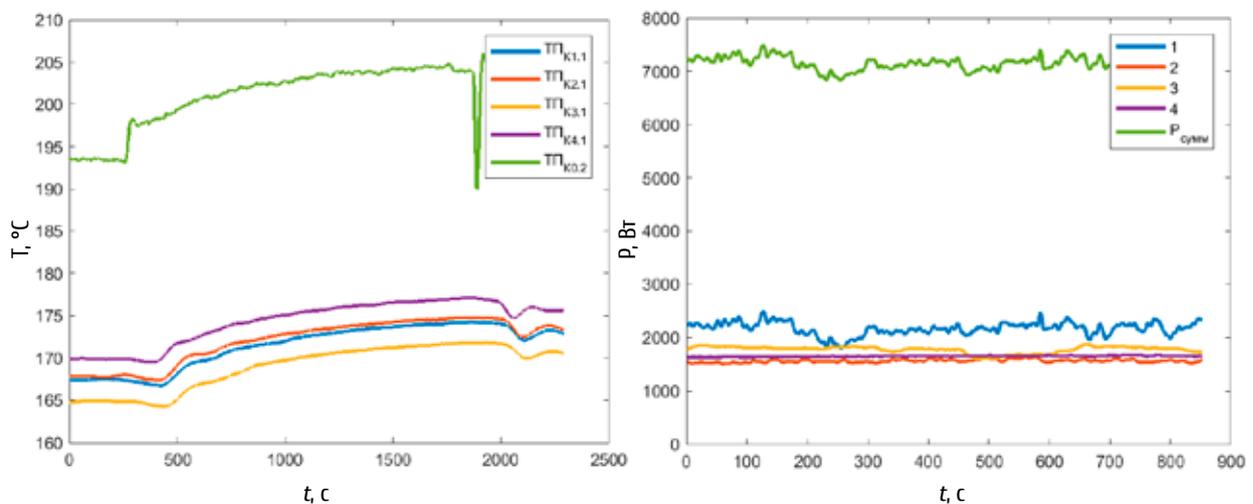


Рис. 2.1.6 – а) Изменение температуры теплоносителя на выходе из горячей зоны ТПк0,2 и перед входом в модель ТВС (ТПк1,1 – ТПк1,4). б) Графики изменения подводимой тепловой мощности (P) и отводимого тепла от каждой циркуляционной петли (1–4)

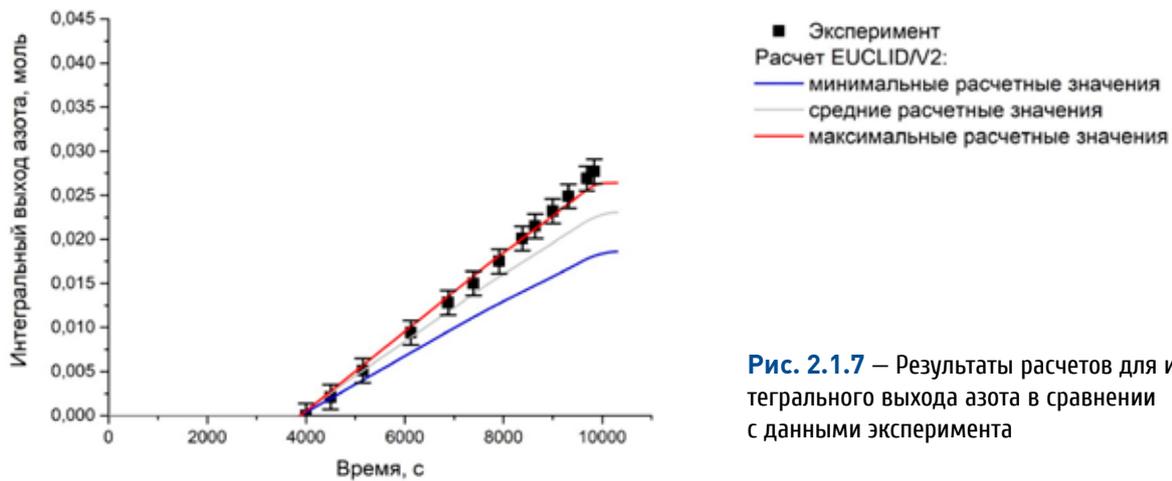


Рис. 2.1.7 — Результаты расчетов для интегрального выхода азота в сравнении с данными эксперимента

свинца и стали ЭП823-Ш в окислительной атмосфере (ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова», Россия). Результаты расчетов интегрального выхода азота в средних и максимальных значениях удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными (рис. 2.1.7).

4. С использованием интегрального кода **ЕВКЛИД/V2** проведены расчеты **запроектной аварии с непредусмотренным извлечением из активной зоны стержней РС вследствие отработки ложного сигнала** (авария типа TOP) для РУ БН-1200М с а.з. с МОКС и СЧУП топливом.

КЛЮЧЕВЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАБОТ

1. Т. А. Сайкина, Э. В. Усов, В. И. Чухно, П. Д. Лобанов, С. И. Лежнин, Н. А. Прибатурин. Валидация тяжелоаварийного модуля интегрального кода ЕВКЛИД/V2 на базе экспериментов по разрушению имитаторов одиночных твэлов и ТВС // Теплоэнергетика, 2023, — № 4, — С. 45–54. (T. A. Saikina, E. V. Usov, V. I. Chukhno, P. D. Lobanov, S. I. Lezhnin, and N. A. Pribaturin. Validation of the Severe Accident Module of the EUCLIDE/V2 Integral Code on the Basis of Experiments on a Failure of Simulators of Single Fuel Rods and Fuel Assemblies // Thermal Engineering, 2023, — Vol. 70, — No. 4, — pp. 281–289).
2. А. А. Бутов, Д. Д. Каменская, И. А. Климонов, Н. А. Мосунова, Э. В. Усов, С. В. Цаун, В. И. Чухно. Моделирование поведения расплава в устройстве для сбора топлива реакторной установки с натриевым теплоносителем с помощью модуля HEFEST-FR интегрального кода ЕВКЛИД/V2 // Теплоэнергетика, 2023, — № 11, — С. 5–13. (Butov A.A., Kamenskaya D.D., Klimonov I.A., Mosunova N.A., Usov E.V., Tsaun S.V., Chukhno V.I. Simulation of melt behavior in the sodium-cooled reactor core catcher using the EUCLID/V2 integrated computer code HEFEST-FR module // Thermal Engineering. 2023. — V. 70. — № 11. — pp.841–848).
3. Климонов И. А., Мосунова Н. А., Стрижов В. Ф., Усов Э. В., Чухно В. И. Использование теплогидравлического модуля HYDRA-IBRAE/LM интегрального кода ЕВКЛИД для расчета парогенераторов установок с натриевым теплоносителем // Теплоэнергетика. 2023. — № 12. — С.5–11. (Klimonov I.A., Mosunova N.A., Strizhov V.F., Usov E.V., Chukhno V.I. Application of the EUCLID integrated code's HYDRA-IBRAE/LM thermal hydraulic modules for analyzing the steam generation of sodium cooled reactor plants // Thermal Engineering. 2023. — V. 70. — № 12. — pp. 965–970).
4. Усов Э. В. Экстраполяция свойств жидкого натрия в область высоких температур и перегревов // Теплофизика высоких температур, 2023. — Т. 61. — вып. 5. — С. 665–672. (E. V. Usov. Extrapolation of Liquid Sodium Properties to the Region of High Temperatures and Overheating // High Temperature, 2023, — Vol. 61, — No. 5, — pp. 604–610).
5. Э. В. Усов, В. И. Чухно, И. А. Климонов, Д. П. Вепрев, Н. А. Мосунова, В. Ф. Стрижов. Численное исследование термического разрушения ТВЭЛов с нитридным топливом с использованием тяжелоаварийного модуля интегрального кода ЕВКЛИД/V2 // Теплофизика высоких температур, 2023. — Т. 61. — вып. 6. — С. 898–904. (E. V. Usov, V. I. Chukhno, I. A. Klimonov, D. P. Veprev, N. A. Mosunova, and V. F. Strizhov. Numerical Study of Thermal Destruction of Nitride Fuel Rods Using the Severe Accident Module of the Integral Euclid/V2 Code // High Temperature, 2023, — Vol. 61, — No. 6, — pp. 824–829).



ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ УПРАВЛЕНИЯ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ



НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ
НАПРАВЛЕНИЯ

Научный руководитель
ИБРАЭ РАН

Л. А. Большов

академик РАН
(bolshov@ibrae.ac.ru)



Заведующий отделом

С. В. Сумароков

(sumarokov@ibrae.ac.ru)

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

ТЕХНОЛОГИИ УПРАВЛЕНИЯ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ (PLM – PRODUCT LIFECYCLE MANAGEMENT), ВКЛЮЧАЯ ТЕХНОЛОГИИ ПРОВЕДЕНИЯ ВИРТУАЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ ИЗДЕЛИЙ.



ОСНОВНЫЕ ИТОГИ 2023 ГОДА

1. Система «УРАНИЯ»

В рамках ПН «Прорыв» продолжается разработка системы «УРАНИЯ». Система управления данными и процессами расчётных и экспериментальных научных исследований «УРАНИЯ», предназначенной для организации совместной работы всех участников процессов проведения расчётных и экспериментальных исследований.

Система «УРАНИЯ» создаётся при поддержке ведущих разработчиков РУ на быстрых нейтронах — АО «ОКБМ Африкантов» и АО «НИКИЭТ». В качестве платформы для системы «УРАНИИ» выступает система CML-Bench, разработанная Санкт-Петербургским политехническим университетом Петра Великого.

В 2023 году:

- состоялся ввод системы «УРАНИИ» в постоянную эксплуатацию у первого пользователя — интегрирующей структуры АО «Прорыв»;
- успешно завершены испытания релиза 3.0 системы «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;
- разработан релиз 4.0 системы «УРАНИИ», дополненный функциями по интеграции с базами экспериментальных данных и системами управления жизненным циклом изделий предприятий-пользователей, взаимодействия с внешними расчётными системами.

► *В 2024 году планируется ввод системы «УРАНИЯ» в постоянную эксплуатацию в АО «ОКБМ Африкантов».*

2. Расчётные комплексы для решения оптимизационных задач и параметрических исследований

В рамках ПН «Прорыв» 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. В 2023 году проводились работы над четырьмя РКО для решения задач оптимизации: режимов эксплуатации РУ (РКО РЭ): нагрузок на трубопроводные системы (РКО ТС): конструкции оборудования на основе его прочностных характеристик (РКО ПК), а также для решения нейтронно-физических задач (РКО НФ). Например, РКО НФ, предназначенный для поддержки расчётов активных зон быстрых реакторов с жидкометаллическими теплоносителями кодом ЕВКЛИД, был дополнен графическим интерфейсом пользователя, также был расширен функционал автоматического формирования модели активной зоны РУ.

В 2023 году проведены успешные приёмочные испытания перечисленных выше РКО. В ходе приёмочных испытаний РКО НФ (рис. 2.1.9) совместно с АО «НИКИЭТ» была решена задача минимизации значения максимальной температуры оболочек твэлов модели стартовой загрузки а. з. РУ БР-1200. При оптимизации варьировались геометрические параметры ТВС, размеры топливных подзон, позиции расположения ТВС с ПКР, а также ряд иных параметров и ограничений. По результатам получена конфигурация с наименьшим значением максимальной температуры оболочек твэлов.

► *В 2024 году запланированы работы по внедрению РКО на предприятиях-пользователях, а также дальнейшее развитие функционала РКО ТС и РКО НФ.*

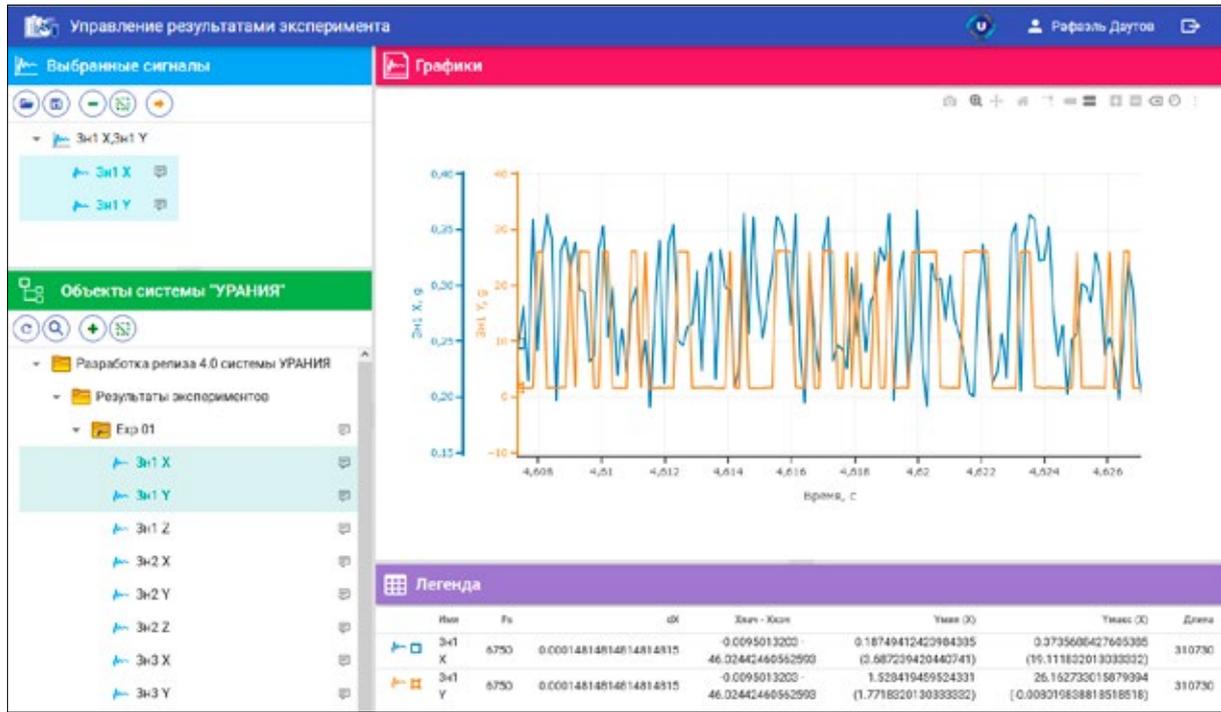


Рис. 2.1.23 – Интерфейс модуля управления экспериментальными данными системы «УРАНИЯ»

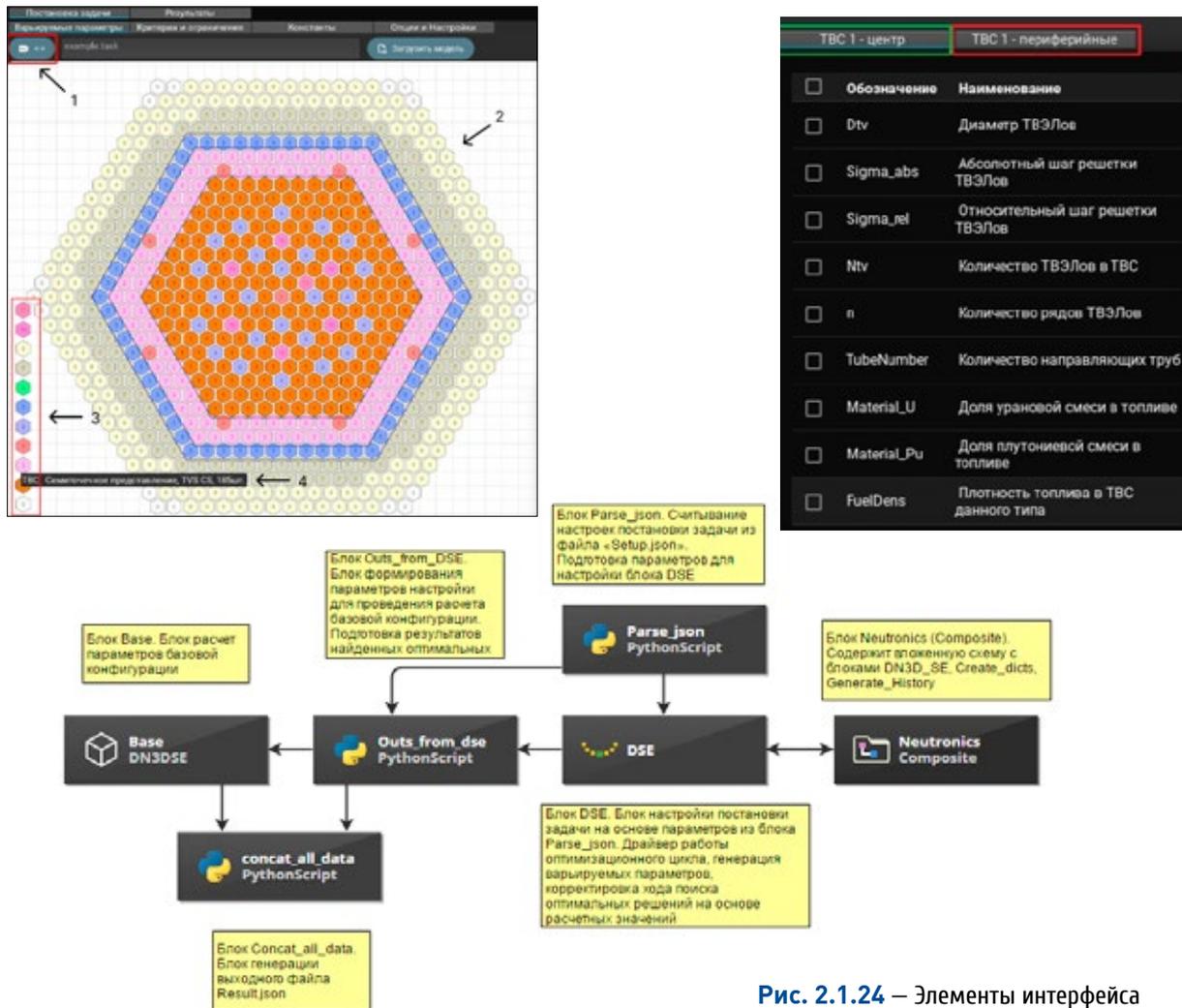


Рис. 2.1.24 – Элементы интерфейса пользователя и расчётной схемы РКО НФ

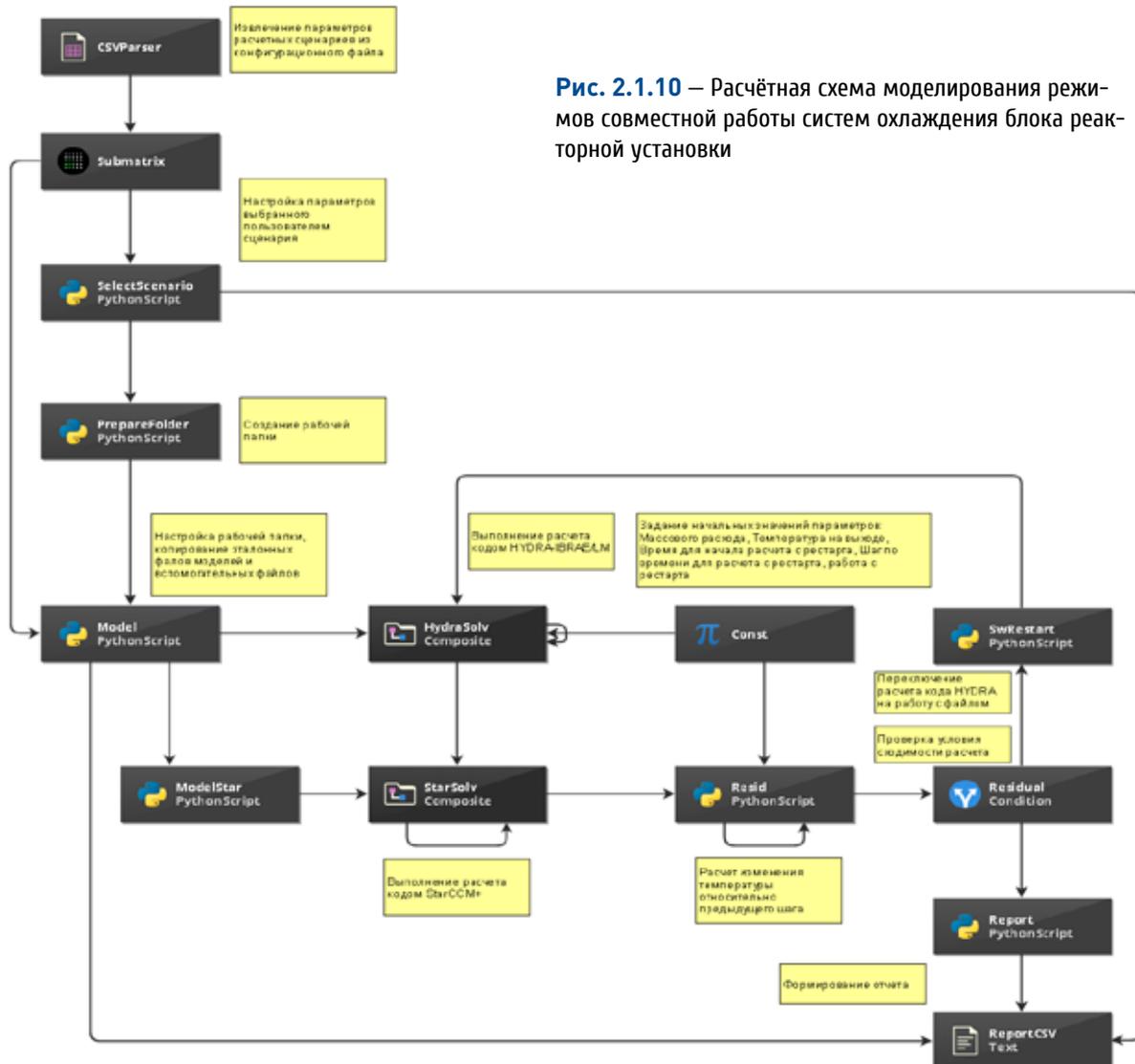


Рис. 2.1.10 – Расчётная схема моделирования режимов совместной работы систем охлаждения блока реакторной установки

3. Автоматизация расчёта режимов совместной работы систем охлаждения блока реакторной установки БРЕСТ-ОД-300

Обоснование безопасности РУ часто требует расчёта сложных систем с использованием нескольких расчетных кодов, в том числе теплогидравлических CFD-кодов и более быстрых системных кодов. Эта связка особенно актуальна, когда для части системы необходимы детальные характеристики, а другая часть системы может быть рассчитана на основе средних по объему ячейки величин. Для решения данной задачи были реализованы механизмы обмена данными между расчётным кодом HYDRA-IBRAE/LM и CFD-кодом STAR-CCM+ в рамках решения задач в сопряжённой постановке (рис. 2.1.10). Использование автоматизированного решения позволяет снизить трудозатраты расчётчика и сократить общее время расчётов в 2—3 раза.

КЛЮЧЕВЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАБОТ

1. Т.К. Жабоев, А.С. Саченко, С.В. Сумароков, А.В. Попов, Е.Н. Кулаков. Подбор настроек регуляторов модели энергоблока на базе расчетного комплекса для решения оптимизационных задач, Информационные технологии в проектировании и производстве, 2023, — № 2 (190), — С. 3–12.
2. А.А. Кечков, С.В. Сумароков, И.В. Нетронин, К.В. Комиссаров, Е.Ю. Повереннов. Реализация интеграции PLM-системы проекта БН-1200 с системой "УРАНИЯ", Информационные технологии в проектировании и производстве, 2023, — № 3 (191), — С. 31–38.

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 проектам привлекаются специалисты иных отделений Института и научных организаций. Основные работы выполняются в рамках мероприятий федеральной целевой программы «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016—2020 годы и на период до 2035 года» (ФЦП ЯРБ-2) и федерального проекта «Разработка технологий управляемого термоядерного синтеза и инновационных плазменных технологий».



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);



ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

В 2023 году отделением были выполнены работы в рамках 11 контрактов и договоров (в т. ч. 4 полностью завершены), заключённых с Госкорпорацией «Росатом», АО «Концерн Росэнергоатом», АО «Техснабэкспорт» и другими организациями отрасли, а также 2 НИР государственного задания Минобрнауки России. Эти работы охватывали пять крупных направлений:

- 1 СОЗДАНИЕ ЦИФРОВЫХ ИНСТРУМЕНТОВ ДЛЯ ЗАДАЧ ПЛАНИРОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ ВЭ И ОБРАЩЕНИЯ С РАО
- 2 РАЗРАБОТКА И ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПО ВЭ ОИАЭ И ОБРАЩЕНИЮ С РАО
- 3 БЕЗОПАСНОСТЬ ТЕРМОЯДЕРНЫХ И ГИБРИДНЫХ СИСТЕМ И РАЗВИТИЕ НОРМАТИВНОЙ БАЗЫ
- 4 МЕТОДИЧЕСКОЕ И НОРМАТИВНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МЕРОПРИЯТИЙ В СФЕРЕ ЗСЖЦ
- 5 МОНИТОРИНГ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ФЦП ЯРБ-2 И ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПУБЛИЧНОСТИ МЕРОПРИЯТИЙ

ОСНОВНЫЕ ИТОГИ 2023 ГОДА

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

Общая стратегия развития цифровизации

Проведённый анализ ландшафта IT-решений в данной области демонстрирует более эффективное решение задач обоснования оптимальных вариантов конечного состояния объектов, разработки проектов ВЭ, оценки образования РАО и обеспечения безопасности. Но также очевидны недостаточность покрытия таких операций, как КИРО и разработка проектно-сметной документации с применением технологий информационного моделирования, сложность обмена цифровыми данными и отсутствие централизации при внедрении новых цифровых технологий.

По итогам проведённого анализа приоритетными задачами на 2024—2025 гг. по этому направлению определены:

- трансформация отраслевой концепции ВЭ с включением в неё элементов IT-стратегии, применение технологий информационного моделирования и мер по развитию системы управления ВЭ;
- перевод документации в электронный вид (во избежание рисков окончательной утраты) вне зависимости от сроков разработки проектов ВЭ;
- внедрение цифровых решений по планированию, выполнению и представлению результатов КИРО и переход на двухстадийное проведение КИРО с предварительным радиационным обследованием объекта, анализом результатов предпроектных проработок, включая статистические методы аппроксимации данных о радиационном загрязнении и итоговым КИРО, в рамках которого разрешаются ключевые неопределённости;

- создание центра компетенций в структуре системы управления ВЭ для развития среды общих данных по ВЭ для отрасли и её наполнения на основе опыта практических работ;
- инициирование работ по совершенствованию нормативной базы ВЭ для установления в ней требований к применению цифровых технологий при ВЭ объектов различных типов, включая единый понятийный аппарат, а также рекомендаций к устанавливаемому при проектировании ВЭ конечному состоянию площадок ЯРОО с учётом их остаточного радиоактивного загрязнения.

► Эти предложенное и целевое видение системы управления цифровизации в области РАО, ОЯТ и ВЭ ОИАЭ были доложены на заседании (ноябрь 2023 года) НТС № 10 Госкорпорации «Росатом» и отражены в его решении. Результаты также докладывались на Стратегической сессии по ВЭ, прошедшей 31 октября – 1 ноября 2023 года в Санкт-Петербурге.

Разработка и применение цифровых информационных моделей (ЦИМ)

Разработкой новых ЦИМ и применением ранее разработанных существенно расширен круг решаемых с их помощью задач. В том числе:

- Для объектов ПАО «НЗХК» и АО «ОДЦ УГР» выполнены детализированные оценки стоимости работ по ВЭ, разработан комплекс расчётных моделей, получены исходные данные для обоснования безопасности по дозам облучения персонала и населения (геомиграционная модель, модель дозового воздействия при водопользовании, модель атмосферного переноса РВ, модель внешних доз при демонтаже). Тем самым продемонстрирована возможность безопасного проведения демонтажных и дезактивационных работ по ВЭ хвостохранилища ПАО «НЗХК», пункта хранения особых РАО «ДХТО-14» и ПУГР АДЭ-3 АО «ОДЦ УГР». В задачах геомиграции использовались детализированные треугольно-призматические сетки (рис. 2.2.1).

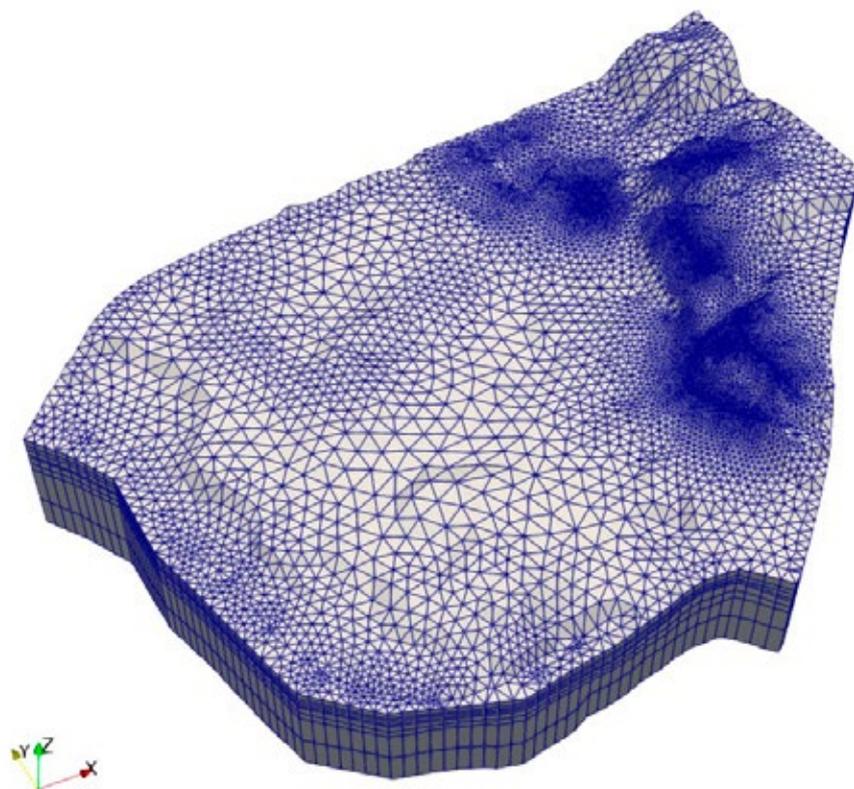


Рис. 2.2.1 – Трёхмерный вид модели с расчётной треугольно-призматической сеткой для площадки АО «ОДЦ УГР»

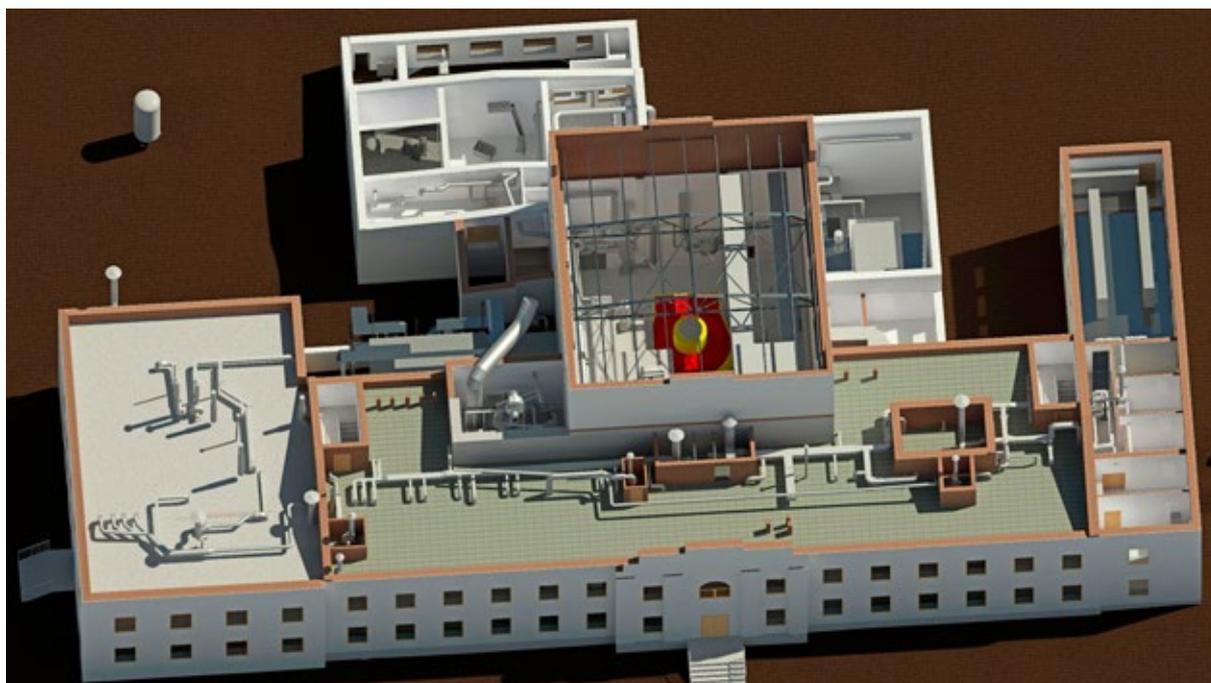


Рис. 2.2.2 – Фрагмент разработанной ЦИМ

- Созданы модели новых объектов — цифровая инженерно-радиационная модель (ЦИРМ) производственных корпусов и территории площадки бывшего ФГУП «РНЦ «Прикладная химия»; здания 85 ИР БР-10 АО «ГНЦ РФ – ФЭИ».
- Актуализирована ЦИРМ площадки и корпусов Московского филиала ФГУП «РАДОН».
- Выполнен комплекс подготовительных работ и сформирован перечень мероприятий по дообследованию объектов и разработке технологических решений, которые позволят в 2024—2025 гг. создать ЦИМ сложных в радиационном отношении и неиспользуемых объектов на площадке радиохимического завода ФГУП «ПО «Маяк» (здание экстракционного разделения нептуния и плутония и здание переработки сбросных растворов РХЗ).

► К концу 2023 года общее количество созданных ЦИМ и ЦИРМ объектов превысило 120. Все они применяются и планируются к применению для обоснования решений по ВЭ и при разработке проекта ВЭ.

Обращение с накопленными и производственными РАО

Важным и новым направлением работ Отделения стало начало работ по созданию Информационно-аналитической системы планирования деятельности по ВЭ ЯРОО и обращению с накопленными и производственными РАО (ИАС РАО). Цифровой инструмент позволит повысить эффективность планирования работ по обращению с РАО и ВЭ ЯРОО с применением опережающих подходов к инфраструктурным и логистическим решениям.

Структура ИАС РАО включает нескольких взаимосвязанных блоков исходных данных и сценарных параметров, расчётных алгоритмов и аналитических инструментов (рис. 2.2.3). Для каждого процесса обращения с РАО с момента образования до передачи на захоронение в ПЗРО в ИАС РАО разработаны математические или логические алгоритмы и осуществляется сквозное моделирование. По итогам каждой операции оцениваются финансово-экономические параметры (стоимость работ, материальные и временные ресурсы) и формируются календари выполнения операций. Для демонстрации результатов расчётов анализируемой имитационной модели доступен широкий выбор визуального представления данных.

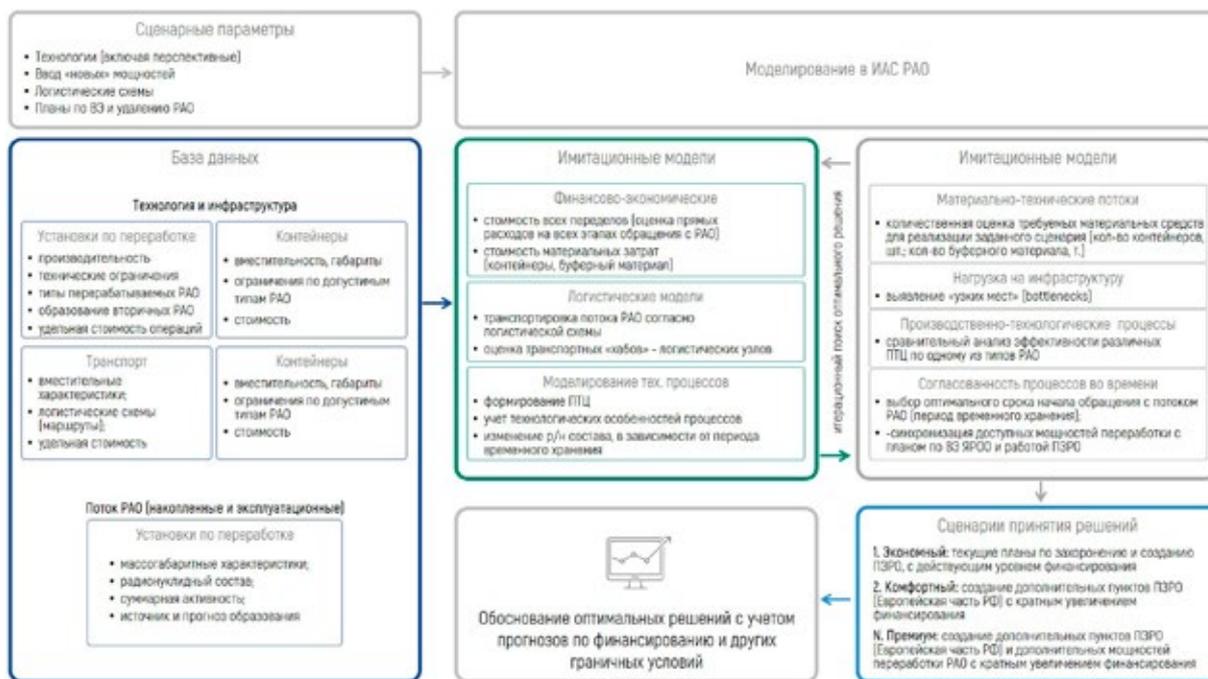


Рис. 2.2.3 – Концептуальная схема ИАС РАО

Таким образом, станет возможна оперативная проработка отдельных мероприятий по обращению с РАО, а затем и обоснование оптимального сценария развития системы обращения с РАО.

► В 2024 году будут продолжены работы по развитию расчётного аппарата и верификации исходных данных, а также выполнены демонстрационные расчёты по различным сценариям деятельности по обращению с РАО. На основе результатов расчётов в ИАС РАО можно будет ответить на ключевые вопросы развития системы обращения с РАО.

2. Разработка технических решений по ВЭ ОИАЭ и обращению с РАО

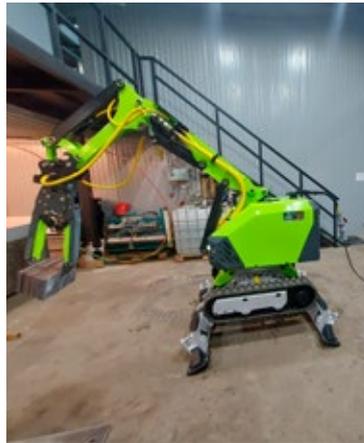
Отработка технологий ВЭ на пилотной площадке Московского филиала ФГУП «РАДОН»

Отработка технологий ВЭ ведется на пилотной площадке Московского филиала ФГУП «РАДОН» уже несколько лет. В 2023 году проведены успешные испытания 3 демонстрационных роботизированных комплексов отечественного производства снаряженной массой от 2,3 до 4,5 т (рис. 2.2.4). В качестве критериев их отбора были: успешное применение в смежных отраслях промышленности, на релевантных объектах пилотной площадки и возможность дооснащения специализированным навесным оборудованием. В ходе испытаний подтверждена работоспособность и заявленная производителями функциональность оборудования, определены технические параметры для прогнозной оценки стоимости операций ВЭ при их эксплуатации.

► На 2024 год запланирована разработка специализированного навесного оборудования для тестирования и тиражирования положительного практического опыта.



РОИН РСТ Р-100
(АО МГК «ИНТЕХРОС», г. Воронеж)



Бетонолом-2000
(ООО «Роботехникс», г. Мытищи)



Малогабаритная платформа
«Капитан» (ЦНИИ РТК,
г. Санкт-Петербург)

Рис. 2.2.4 – Тестирование роботизированных комплексов в условиях пилотной площадки

Обследование территорий пилотной площадки

Выполнено **комплексное обследование территории площадки** в обеспечение разработки технологии очистки грунта, в том числе с привлечением мобильных платформ с различным типом движителя для тестирования на предмет целесообразности их внедрения при производстве КИРО.

По итогам 2023 года **наибольший потенциал** для применения выявлен у платформы «Капитан». При её дооснащении приборами радиационного контроля (РК) и специализированными устройствами будет обеспечено решение широкого круга задач по ВЭ. Также определены перспективы применения ксенонового гамма-спектрометра (КГС) в установках сортировки грунта для повышения порядка точности при отнесении к классам РАО, что запланировано к опробованию в 2024 году.

В рамках исследования грунта пилотной площадки пробурено **12 скважин** глубиной от 15 до 30 м, общая протяженность **240 п.м.**, отобрано и проанализировано более **260 проб** грунта, определены его радиационные характеристики и физико-химические свойства.

Реабилитация радиоактивно загрязненных территорий (РЗТ)

Комплексный подход, применяемый к исследованию грунта пилотной площадки, позволил обосновать оптимальную схему очистки РЗГ, основанную на сочетании стадий механической сортировки, гидросепарации, реагентной и ультразвуковой обработки, обеспечивающих снижение содержания тяжёлых металлов ниже уровня ПДК и коэффициент сокращения объёма РЗГ в **2,3 раза** с явным потенциалом к росту. Полученные результаты создают основу для разработки промышленной технологии очистки РЗГ от химических и радиационных загрязнений и её отработке на пилотной площадке с целью уточнения технологических параметров и коэффициентов очистки.

Оценка объёмов РАО от вывода из эксплуатации энергоблоков АС

В 2023 году начались **работы по оценке массы, вида и класса РАО**, приведённых к критериям приемлемости, образующихся при выводе из эксплуатации блоков АС для АО «Концерн Росэнергоатом». Объектами оценки являются системы, оборудование, строительные конструкции референтных блоков АС с реакторами типа ВВЭР-1000, ВВЭР-440, БН-600, РБМК-1000, ЭГП-6. Работы выполняются с участием ВНИИАЭС и Атомэнергопроект.

Основными работами первого этапа стали систематизация исходных данных и разработка типовой методологии выполнения прогнозных оценок объёмов РАО с учётом вариативности имеющихся исходных данных (рис. 2.2.5).



Рис. 2.2.5 – Блок-схема прогнозной оценки образования РАО от ВЭ энергоблоков АС

► *Итоговые оценки объёмов и типов РАО от ВЭ референтных энергоблоков должны быть получены в 2025 году.*

Оптимизация решений по ВЭ бассейна-хранилища ЖРО

Для бассейна-хранилища **ЖРО 365** ФГУП «ГХК» проведен анализ проектно-сметной документации на вывод из эксплуатации, результатом которого стали предложения по оптимизации проектных решений с привязкой к наиболее дорогостоящим работам, оборудованию, изделиям и материалам. По предварительной экспертной оценке, экономический эффект от внедрения предлагаемых решений позволит сократить капитальные затраты на ~400 млн руб.

3. Безопасность термоядерных и гибридных систем и развитие нормативной базы

Работы ведутся в рамках федерального проекта «Разработка технологий управляемого термоядерного синтеза и инновационных плазменных технологий».

Совместно с сотрудниками Отделения разработки программного обеспечения для анализа безопасности АЭС, Отделения анализа безопасности ядерных энергетических установок и с привлечением соисполнителя (ФБУ «НТЦ ЯРБ») в 2023 году:

- продолжены работы по созданию семейства расчётных кодов для решения задач анализа безопасности широкого спектра установок УТС. Завершена верификация и валидация двух программных средств для анализа безопасности установок управляемого термоядерного синтеза — кода TRITIUM-F для оценки миграции и накопления трития в технологических системах ОНЯТ и кода нуклидной кинетики TRACT-F для оценки радионуклидных составов и радиационных характеристик материалов установок УТС;
- завершена разработка модели установки ИТЭР для тестирования отечественного интегрального кода СОКРАТ в условиях запроектных аварий с потерей теплоносителя (LOCA) и вакуума (LOVA). Результаты показали хорошую сходимость с результатами расчётов по зарубежным кодам, использовавшимся для обоснования безопасности ИТЭР;
- разработаны проекты федеральных норм и правил, регулирующих общие требования безопасности для установок УТС, структуру и содержание отчёта по обоснованию безопасности установок УТС с магнитным удержанием плазмы, подготовлены методические указания по проведению ОВОС для установок УТС;

- выполнены предварительные оценки: доз облучения персонала; радиационной защиты; мер по защите персонала; активации конструкционных материалов и образования радиоактивных отходов в результате работы токамака реакторных технологий (ТРТ).

► В 2024 году планируется завершение работ по первому этапу федерального проекта.

4. Методическая и нормативное обеспечение мероприятий в сфере ЗСЖЦ

Выработка рекомендаций по переводу ПРОРАО в ПКОРАО или ПЗРО

Необходимость внесения изменений в критерии отнесения РАО к особым и удаляемым (в соответствии с постановлением Правительства Российской Федерации от 29.10.2022 № 1929) и общая стратегия развития ЕГС РАО актуализировали планирование работ по обращению с особыми РАО, в том числе пересмотр статуса ПДХ РАО, которые ранее не могли быть отнесены к особым. Предусмотрено создание дорожной карты по переводу ПДХ РАО в ПРОРАО и ПРОРАО в ПКОРАО или в ПЗРО с учётом доступного финансирования, темпов ввода в эксплуатацию ППЗРО и работ в рамках мероприятий ФЦП ЯРБ-2.

► Разработка стратегического документа будет завершена в 2025 году.

В 2023 году выполнена систематизация данных по характеристикам ПРОРАО, включая планы по их переводу в ПКОРАО или ПЗРО, и планы по дополнительному размещению РАО в ПРОРАО. Систематизированы сведения о **73** пунктах хранения особых РАО (**72** ПРОРАО и **1** ПКОРАО), расположенных на площадках **10** организаций. Общий объём ТРО, хранящихся в ПРОРАО, по состоянию на конец 2023 года составляет **6,77×10⁷ м³**, из которых **1,06×10⁷ м³** были размещены после 15.07.2011, аналогичные показатели для ЖРО (за исключением спецводоемов ФГУП «ПО «Маяк») достигают **4,88×10⁶** и **1,07×10⁶ м³** соответственно. По результатам анализа данных определены меры по их уточнению.

Применение изменённых критериев классификации удаляемых РАО

Постановлением Правительства Российской Федерации от 29.10.2022 № 1929 были внесены изменения и в критерии классификации удаляемых РАО. В 2023 году был разработан проект «Единые отраслевые методические указания по установлению классов РАО для захоронения с применением критериев, утвержденных постановлением Правительства Российской Федерации от 29.10.2022 № 1929» (ЕОМУ).

Проект ЕОМУ прошел согласование с предприятиями, в результате деятельности которых образуются РАО, ФГУП «НО РАО», а также Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзор). Окончательная редакция ЕОМУ утверждена и введена в действие приказом Госкорпорации «Росатом» от 31.01.2024 № 1/148-п.

Предложения по актуализации отраслевых документов в сфере ЗСЖЦ

Выполнены работы по актуализации отраслевой Концепции вывода из эксплуатации ядерных установок, радиационных источников и пунктов хранения, утверждённой в 2014 году. В новой редакции предложены три этапа её реализации с предлагаемым горизонтом планирования до 2050 г. и значительное усиление роли ИТ-технологий.

Предложен вариант актуализации «Единых отраслевых методических указаний по составу разделов проектной документации на вывод из эксплуатации объектов использования атомной энергии» (ЕОМУ), утверждённых Приказом Госкорпорации «Росатом» № 1/1813-П от 30.12.2021 г. и «Единых отраслевых методических рекомендаций по разработке локальной концепции вывода из эксплуатации объекта использования атомной энергии» (ЕОМР), утверждённых 27.11.2017 г.

Для ЕОМУ предложены исключения дублирования информации по разделам проектной документации и ряд редакционных правок и дополнений.

Изменения в ЕОМР направлены на упрощение порядка согласования концепций вывода из эксплуатации ОИАЭ, ВЭ которых предполагается в отдалённой перспективе, а также синхронизация описания конечных состояний с положениями нормативно-правового регулирования. Корректировка выполнялась с учётом предложений по актуализации отраслевой концепции по ВЭ, а также документов Ростехнадзора РБ-153-18 и РБ-008-21.

5. Мониторинг эффективности реализации ФЦП ЯРБ-2 и обеспечение публичности мероприятий

Работа по сопровождению ФЦП ЯРБ-2 ведётся в ИБРАЭ РАН с 2008 года и является системообразующей для обоих отделений Института по направлению ЗСЖЦ.

В 2023 году развита информационно-аналитическая система (ИАС ФЦП ЯРБ): разработаны **20** новых форм для ввода/вывода данных, оптимизированы существующие тематические подразделы, осуществлено серверное и техническое сопровождение работ. Структурированы сведения о реализации ФЦП ЯРБ-2: на конец 2023 года электронный архив ИАС ФЦП ЯРБ насчитывал более 15 тыс. документов, прирост за год составил около 1 тыс. документов. Актуализировано более 120 паспортов мероприятий ФЦП ЯРБ-2, отражающих основные цели и результаты выполнения работ, исходное состояние и функционально-технические параметры объектов использования атомной энергии, релевантные результаты интеллектуальной деятельности и научные публикации.



Рис. 2.2.6 – Структура ИАС ФЦП ЯРБ

Работы по цифровизации и автоматизации процессов позволили увеличить скорость и качество подготовки справочных материалов о ходе реализации ФЦП ЯРБ-2 в несколько раз. На основе данных ИАС ФЦП ЯРБ выполнялась аналитическая и методическая поддержка Госкорпорации «Росатом» при оценке эффективности и результативности реализации мероприятий Программы за 2023 год.

В рамках комплексного мониторинга сформированы предложения в проект внесения изменений в ФЦП ЯРБ-2, включающие, помимо корректировки объемов финансирования и значений целевых показателей, актуализацию 11 ожидаемых результатов мероприятий, доработку обосновывающих материалов и технических решений по включению НИЦ «Курчатовский институт» в роли государственного заказчика.

Важной компонентой сопровождения работ является обеспечение публичности. В 2023 году организовано и проведено два технических тура на площадки реализации ФЦП ЯРБ-2 (рис. 2.2.7—2.2.8) в г. Железногорске Красноярского края (ФГУП «ГХК» и ФГУП «НО РАО») и в г. Благовещенске Республики Башкортостан (Благовещенское отделение ФГУП «РАДОН»). В мероприятиях приняли участие более 60 представителей общественности, экспертного научного сообщества, федеральных, региональных и отраслевых СМИ.



Рис. 2.2.7 – Технический тур на площадку ФГУП «ГХК» (апрель 2023 года)



Рис. 2.2.8 – Технический тур в Благовещенское отделение ФГУП «РАДОМ» (ноябрь 2023 года)

ИТОГИ МЕРОПРИЯТИЙ И ИНЫЕ МАТЕРИАЛЫ О ПАРАМЕТРАХ, ХОДЕ И РЕЗУЛЬТАТАХ РЕАЛИЗАЦИИ ФЦП ЯРБ-2 ПРЕДСТАВЛЕНЫ НА САЙТЕ ФЦП-ЯРБ.РФ, В Т. Ч.:

~250 ИНФОРМАЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ О РЕЗУЛЬТАТАХ ПРОГРАММЫ В 2023 ГОДУ;

АКТУАЛИЗИРОВАННАЯ ИНФОРМАЦИЯ О РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКЕ В **20** РЕГИОНАХ РЕАЛИЗАЦИИ МЕРОПРИЯТИЙ ПРОГРАММЫ;

САЙТ ФЦП-ЯРБ.РФ В 2023 ГОДУ ПОСЕТИЛО БОЛЕЕ **25** ТЫС. ЧЕЛОВЕК.

КЛЮЧЕВЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАБОТ

1. Богатов С.А., Киркин А.М., Курындин А.В., Линге И.И., Приходько А.В., Синегрибов С.В., Шпиньков В.И. Проблемы безопасности и подходы к разработке регулирующих документов для лицензирования установок управляемого термоядерного синтеза // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез. 2023. – Т. 46. – Вып. 3. – С. 32–46. – DOI: 10.21517/0202-3822-2023-46-3-32-46. – EDN CSAEVO.
2. Кизуб П.А., Блохин П.А., Коновалов В.Ю., Казиева С.Т., Блохин А.И., Ванеев Ю.Е. Моделирование радиационной обстановки около импульсного генератора нейтронов с использованием программного комплекса КОРИДА // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез. 2023. – Т. 46. – Вып. 4. – С. 92–100. – DOI: 10.21517/0202-3822-2023-46-4-92-100.
3. Иванов А. Ю., Ильясов Д. Ф., Мамчиц Е. Г. Развитие подходов к приоритизации вывода из эксплуатации объектов использования атомной энергии // Вестник Российского экономического университета имени Г. В. Плеханова. 2023. – № 4 (130). – С. 31–43. – DOI: 10.21686/2413-2829-2023-4-31-43.
4. Мелихова Е. М., Кузнецова Е. О. К вопросу об общественной приемлемости проектов по захоронению РАО // Радиоактивные отходы. 2023. – № 4 (25). – С. 23–34. – DOI: 10.25283/2587-9707-2023-4-23-34.
5. Ильясов Д. Ф., Иванов А. Ю., Кузнецова Е. О. Методы прогнозирования затрат на поддержание в безопасном состоянии объектов ядерного наследия // Статистика и Экономика. 2023. – Т. 20. – № 6. – С. 70–80. – DOI: 10.21686/2500-3925-2023-6-70-80.



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);

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 2023 ГОДА

1. Расчётные коды

В рамках обеспечения решения задач обоснования эксплуатационной и долговременной безопасности объектов ядерного наследия и пунктов захоронения РАО в 2023 году выполнены работы по тестированию, апробации и верификации **5** расчётных кодов, их интеграции друг с другом, а также с цифровыми информационными моделями (ЦИМ) и базами данных (БД). В частности:

– **FENIA** — 3D-расчёты теплового режима, напряжённо-деформированного состояния и прочности объектов, в том числе находящихся в пределах вмещающей среды. В код внедрены программы построения конечно-элементного разбиения объекта посредством объединения представлений частей конструкции и среды через сеточные интерфейсы, разработаны утилиты для генерации сеточного представления геометрических примитивов; усовершенствованы тетраэдральные конечные элементы, схемы интегрирования по объёму, модели материалов для расчёта НДС, разработаны новые модели для учёта нелинейного объёмного деформирования материалов, проведена верификация моделей материалов и выполнена апробация программы на реальных объектах (рис. 2.2.9).

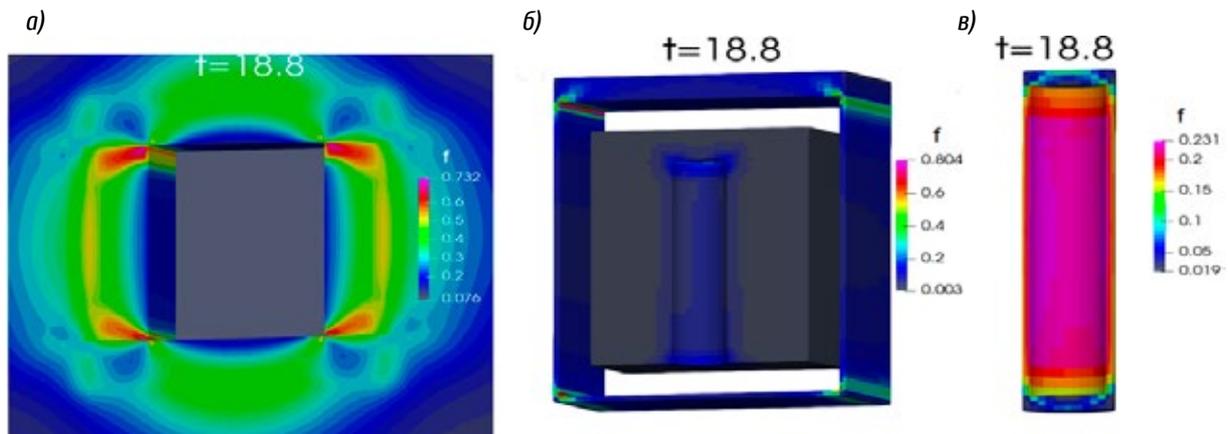


Рис. 2.2.9 – Распределение параметра повреждённости материалов от исходных напряжений, давления набухания бентонита и тепловых нагрузок в траншейной конфигурации ПГЗРО для: а) породы с зоной EDZ, б) обделки и бетона, в) контейнера

– **КОРИДА** — интегральный расчёт нейтронно-физических характеристик реакторных установок и доз облучения для населения и персонала персонала (рис. 2.2.10). Разработан и протестирован кросс-платформенный интерфейс КОРИДА-v2 и ЭКОРАД-v2, разработаны элементы второй версии модуля TRACT и сформирована библиотека активационных нейтронных сечений TRACT/АСТ с включением данных по неопределённостям в ядерно-физических константах, усовершенствованы возможности модуля GRATOR в части различной детализации геометрии моделей для решения задач ВЭ, проведена апробация ЭКОРАД-v2 на практических задачах оценки долговременной безопасности (рис. 2.2.11).

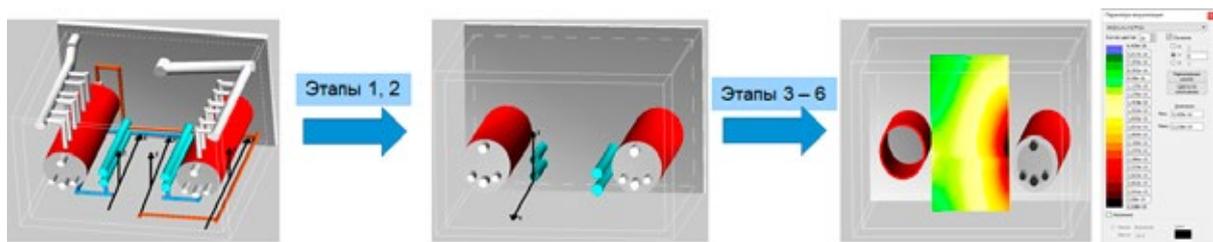


Рис. 2.2.10 – Оценка радиационных полей при демонтаже парогенераторного бокса

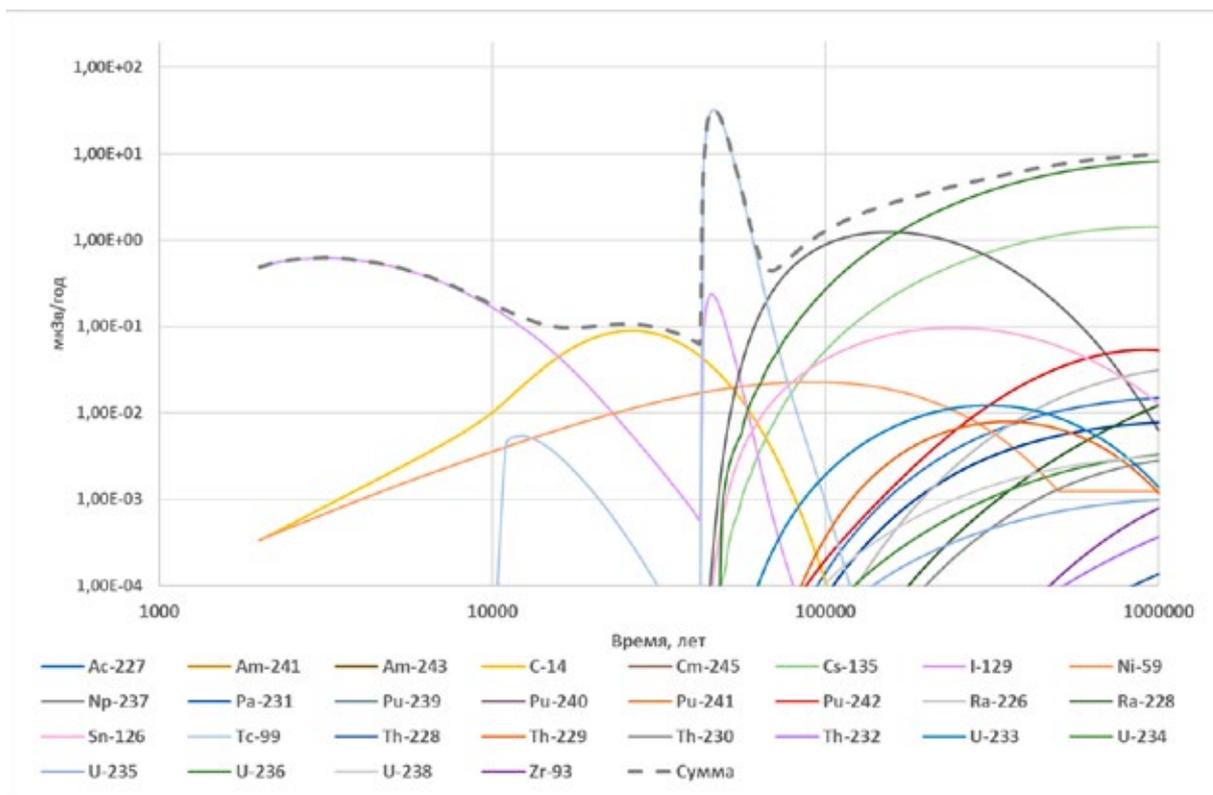


Рис. 2.2.11 – Пример расчёта доз облучения для населения при потенциальном водопользовании для задач обоснования долговременной безопасности типового ПЗРО скважинного типа

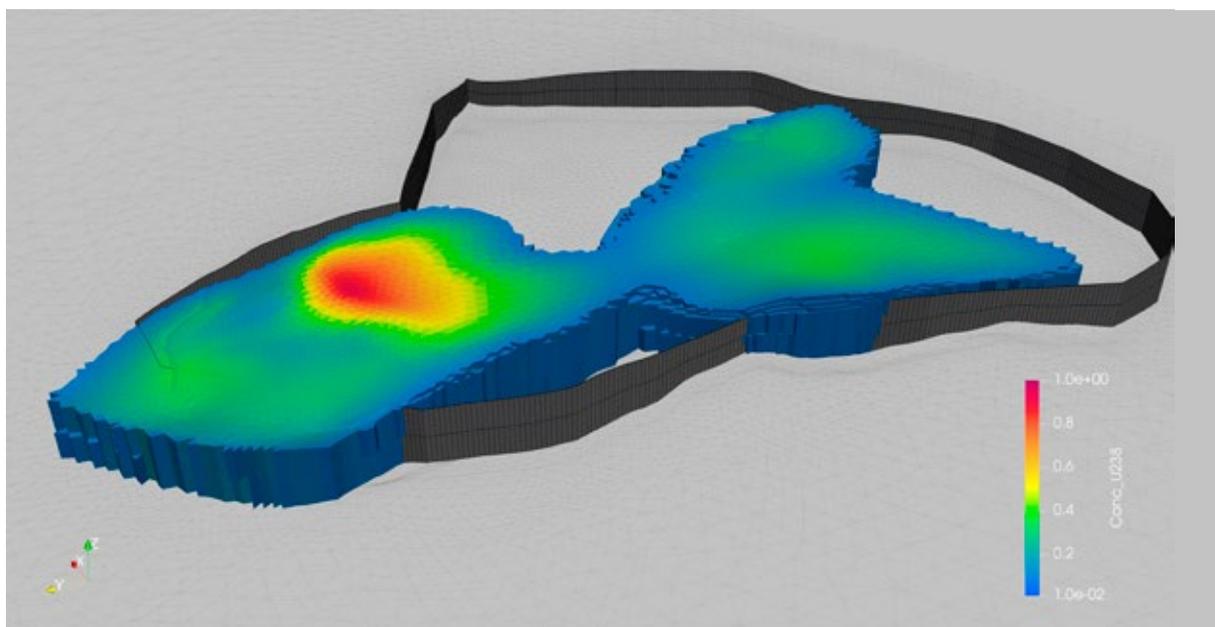


Рис. 2.2.12 – Моделирование миграции радионуклида через «стену в грунте»

– **GeRa** — 3D-гидрогеологическое моделирование. Усовершенствованы сеточные генераторы для моделирования сложных геологических объектов и конструкций ПЗРО, в том числе на основе данных ЦИМ, внедрены новые методы дискретизации задач фильтрации и переноса, разработаны численные модели процессов, определяющих выход радионуклидов из матриц иммобилизации РАО, разработан и численно реализован алгоритм расчёта адвекции-диффузии примеси в неоднородных средах на основе асимптотического подхода, выполнена апробация модели двухфазной фильтрации и переноса в двухфазной системе с использованием параллельных расчётов на модели ПГЗРО, интегрированы модели переноса радионуклидов в поверхностных водах (рис. 2.2.12).

– **MOUSE** — учёт неопределённостей в процессе численного моделирования. Разработана структура хранения многовариантных расчетов совместно с результатами оценки неопределённости и чувствительности, выполнен анализ подходов к оценке сценарной и концептуальной неопределённостей для последующего внедрения в код, выполнен анализ возможностей автоматизации подходов для обоснования выбора метода калибровки (рис. 2.2.13), модифицированы и развиты средства интеграции модулей MOUSE с GeRa и КОРИДА.

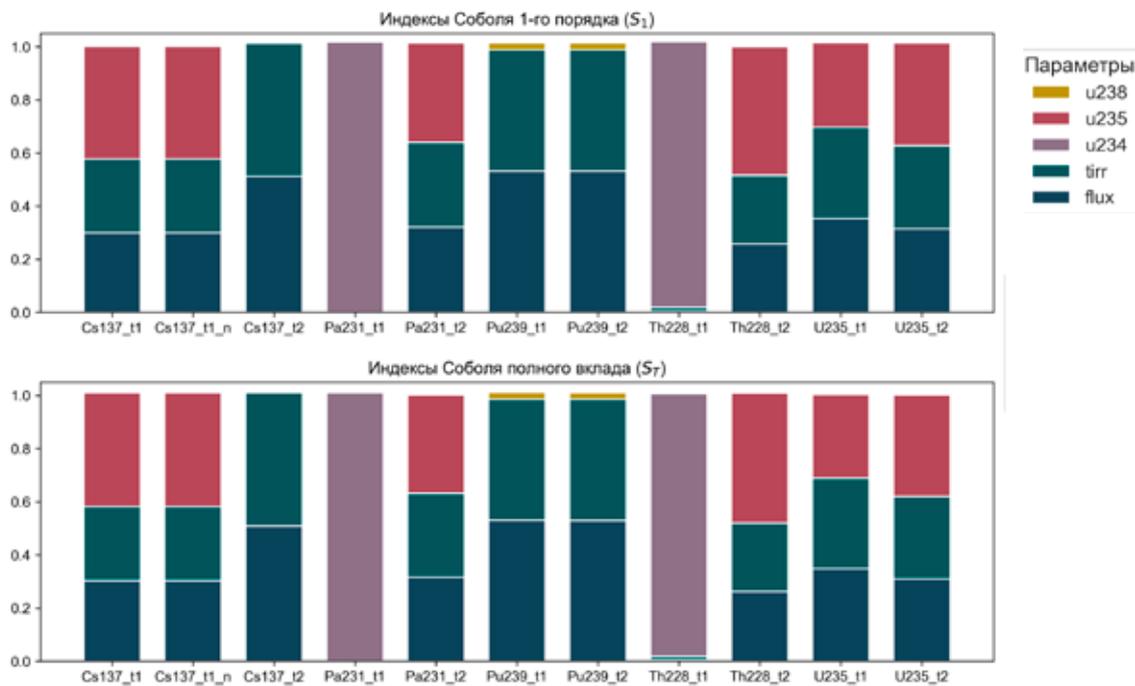


Рис. 2.2.13 — Пример интеграции кодов MOUSE и КОРИДА: анализ чувствительности содержания актиноидов и продуктов деления в ОЯТ ВВЭР к входным параметрам в разные моменты времени (содержанию ^{234}U , ^{235}U и ^{238}U , времени облучения и плотности потока нейтронов)

– **RELTRAN** — прогнозирование последствий атмосферных радиоактивных выбросов. Проведена верификация модуля осаждения радионуклидов с учётом гранулометрического состава аэрозоли в зависимости от типа подстилающей поверхности, реализована детализированная модель для учёта перорального пути поступления радионуклидов, реализованы сервисы и доработан графический интерфейс пользователя для одновременного представления данных мониторинга и результатов расчёта параметров радиационной обстановки (рис. 2.2.14).

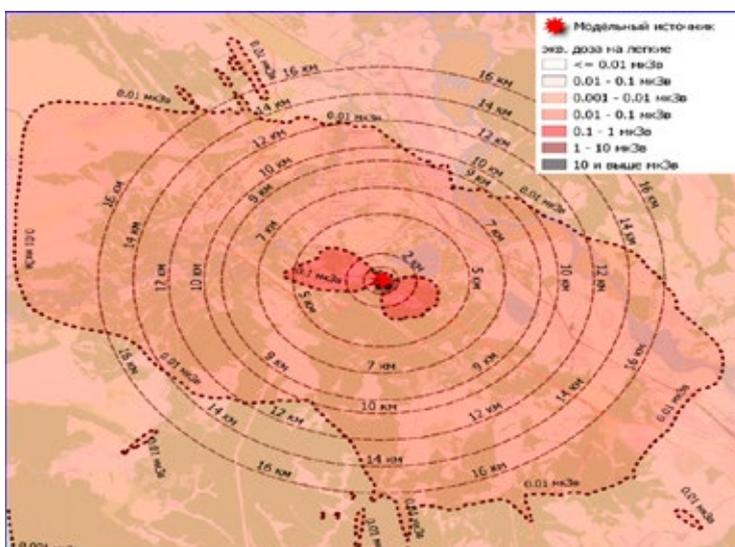


Рис. 2.2.14 — Пример расчёта доз облучения для населения в результате выбросов при проведении работ по выводу из эксплуатации (демонтаже зданий) одного из ОИАЭ

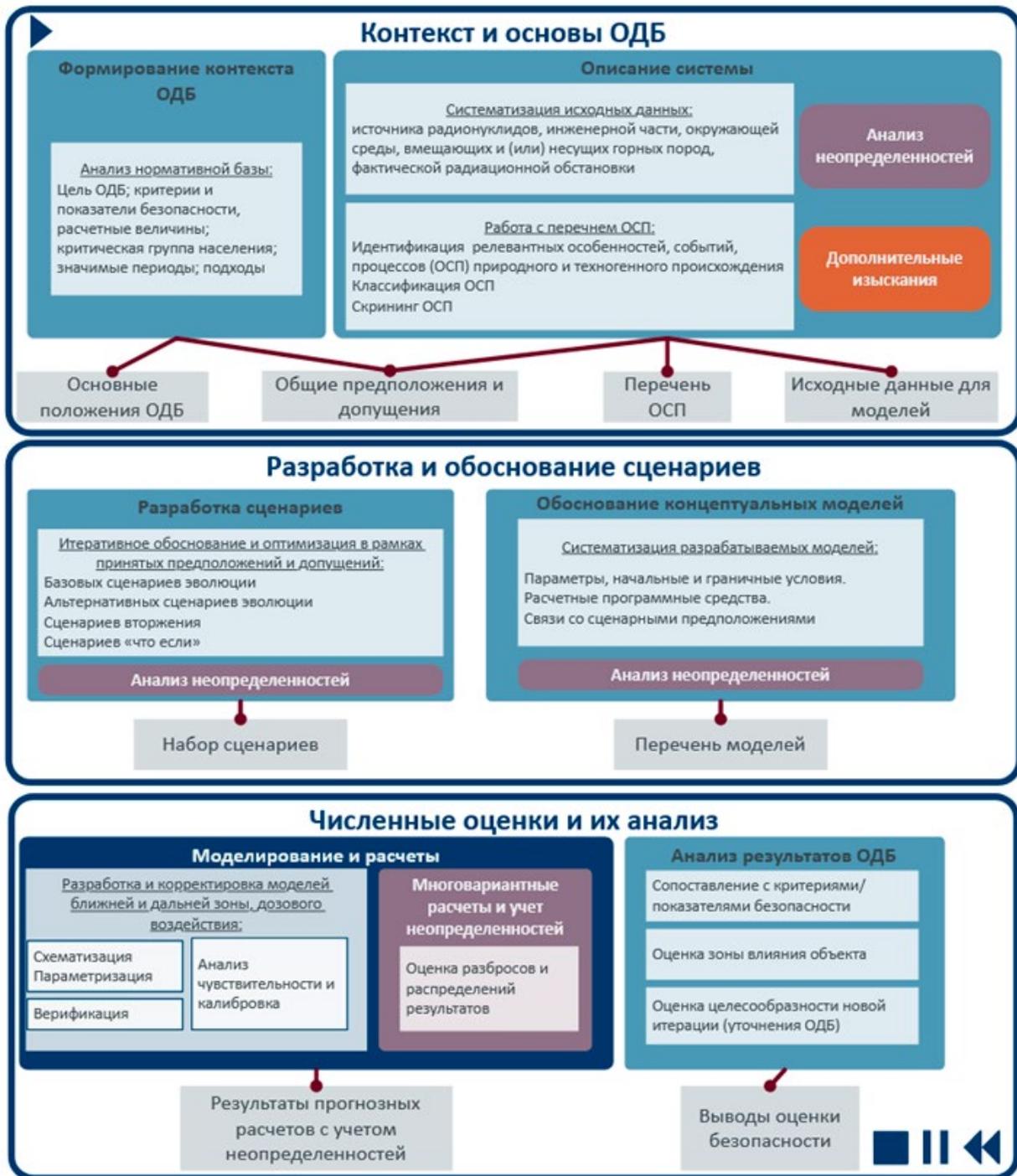


Рис. 2.2.15 – Ключевые этапы методологии проведения ОДБ, реализованные в ИАС

Для всего набора кодов создан прототип и проведено тестирование первой версии информационно-аналитической системы (ИАС) предпроектного расчётно-прогностического моделирования и цифровизации процесса оценки долговременной радиационной и экологической безопасности с учётом особенностей различных видов объектов наследия (рис. 2.2.15).

Коды применялись в задачах обоснования долговременной безопасности при планировании работ по ВЭ ЯРОО (подготовка предложений по возможным вариантам конечных состояний объектов) и обращению с РАО (предложения по программе перевода ПРОРАО в ПКОРАО или ПЗРО и предварительная экономическая оценка стоимости работ по консервации ПРОРАО) на площадках АО «ОДЦ УГР», филиалов ФГУП «РАДОН» и ФГУП «НО РАО», ПАО «НЗХК», а также в проектах АО «Техснабэкспорт».

Коды и разработанные расчётные модели передаются на предприятия Госкорпорации «Росатом» для расчётно-методического сопровождения оценки радиационной безопасности (в 2023 году получены 17 актов о внедрении), а подготовленные учебные версии передаются в высшие учебные заведения для использования численного моделирования в учебном процессе.

17

**АКТОВ О ВНЕДРЕНИИ
КОДОВ И РАСЧЁТНЫХ
МОДЕЛЕЙ**

получены в 2023 году

2. Проект создания подземной исследовательской лаборатории для обоснования безопасности ПГЗРО

Основным направлением деятельности является продолжение исследований геологической среды в районе расположения площадки строительства.

С непосредственным участием ИБРАЭ РАН получена дополнительная лицензия на пользование недрами в зоне потенциального влияния ПГЗРО, дающая возможность расширения района реализации мероприятий по изучению принципиальных для обоснования долговременной безопасности захоронения РАО характеристик геологической среды.

Получено положительное заключение Росгеолэкспертизы на проект геологоразведочных работ (проект ГРР), ориентированный на изучение характеристик массива как на участке строительства, так и в зоне потенциального влияния ПГЗРО. В рамках реализации проекта ГРР продолжены работы по актуализации карты разломов и неоднородностей геологической среды геофизическими методами и выполнены исследования в 10 новых наклонных скважинах (средняя глубина — 165 м) — в том числе откачки, отборы проб воды и образцов горных пород. По итогам исследований: выбраны участки потенциального расположения разрывных нарушений, требующие заверки буровыми методами (глубокими скважинами); получены исходные данные для уточнения строения верхней части геологического разреза; актуализирован комплекс геологических и гидрогеологических моделей масштабов площадки строительства ПИЛ и блока захоронения для последующего использования при оценке и обосновании долговременной безопасности.

При бурении скважин впервые за весь период исследований участка Енисейский была применена технология отбора ориентированного керна, а также с помощью современного скважинного оборудования с применением акустических и видеокаротажных методов уточнено положение трещин в массиве (нижних частей стволов новых скважин). По завершении всех работ скважины были переведены в разряд мониторинговых, в них предлагается проводить наблюдения за гидрогеологическими характеристиками массива.

В 2023 году начато строительство подземного комплекса ПИЛ, вкпе с реализацией мероприятий Программы исследований при проходке стволов специалистами ИБРАЭ. В забое были выполнены геологические описания стенок ствола (рис. 2.2.16), произведён отбор и анализ образцов горных пород (петрография и химический состав). По геологическим данным разработаны трёхмерные цифровые модели горной выработки для интеграции в ЦИМ ПИЛ.

В рамках соглашения о сотрудничестве между ИБРАЭ РАН и ФГУП «ГХК» в подземных объектах ФГУП «ГХК» выполнены исследования приконтурной части массива (параметризация техногенной и естественной трещиноватости, оценка проницаемости нарушенной приконтурной зоны горных выработок) с целью отработки методик исследований в ПИЛ.

В сентябре 2023 года в рамках действующего трёхстороннего соглашения о сотрудничестве между ФГУП «НО РАО», ИБРАЭ и BRUIG (Китай) состоялся визит российской делегации на строящуюся ПИЛ в провинции Бэйшань.

Формат мероприятий предполагал знакомство с историей и компетенциями BRIUG, а также ряд тематических семинаров, ориентированных на обмен опытом по проведению

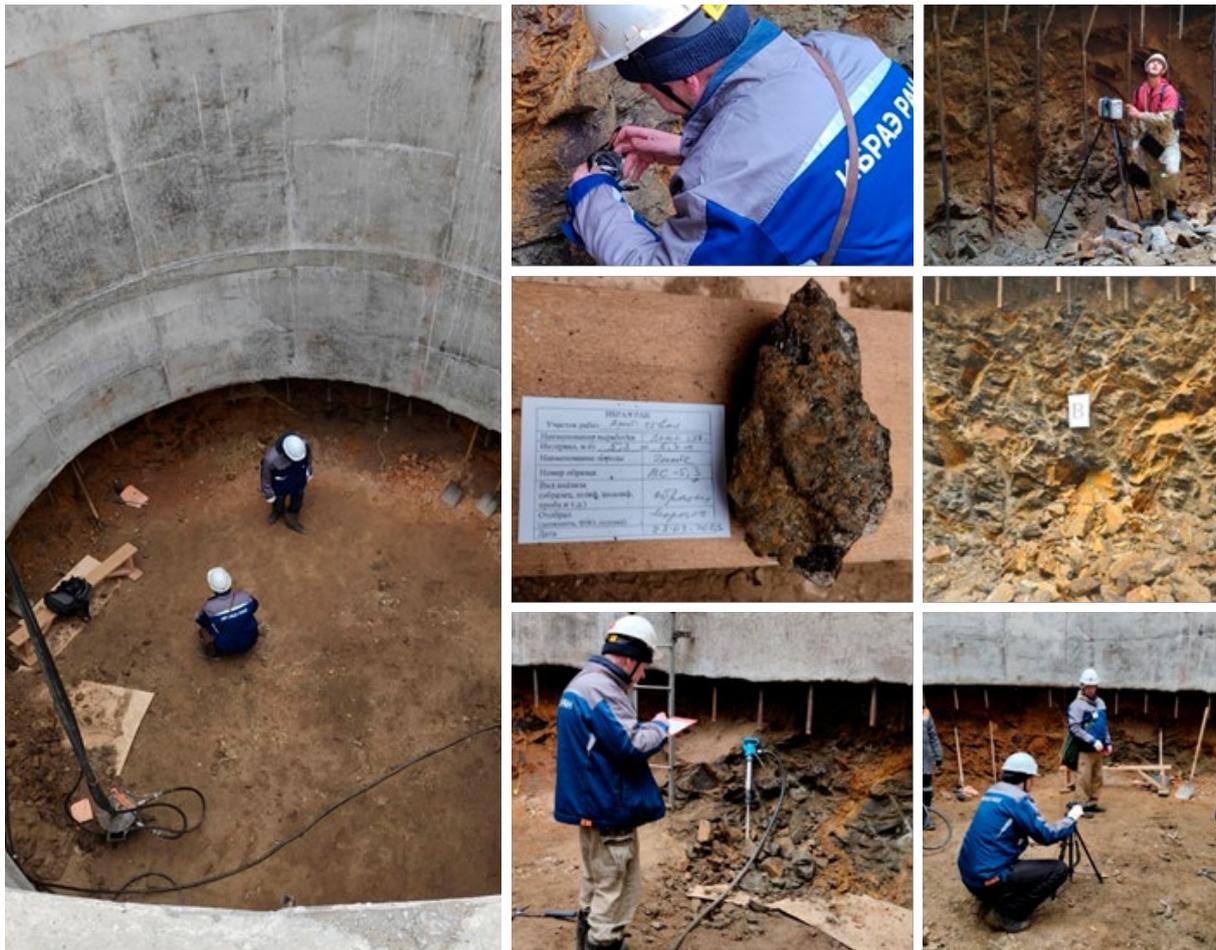


Рис. 2.2.16 – Выполнение работ в забое при проходке ствола вентиляционной шахты ПИЛ



Рис. 2.2.17 – Исследования в подземных выработках ГХК

гидрогеологического мониторинга, геологических исследований, в т.ч. на этапе проходки горных выработок, и расчётных оценок в рамках обоснования долговременной безопасности ПГЗРО. В ходе технических туров в лабораторный кластер BRIUG в Пекине, а также на строительную площадку и горные выработки ПИЛ, коллеги из BRIUG ознакомили российских специалистов с применяемыми технологиями и оборудованием. По итогам визита были намечены основные направления дальнейшего сотрудничества как в рамках проекта MONEH*, так и по смежным направлениям исследований.

* – Международный проект по методам мониторинга и оценки гидрологических свойств горных пород в период строительства комплекса подземных сооружений ПИЛ Бэйшань.



Рис. 2.2.18 – Российская делегация и принимающие коллеги из BRIUG на месте закладки ПИЛ Бэйшань

3. Обоснование радиационной безопасности при реабилитации территорий

Продолжаются работы по оценке радиационных и химических рисков в районах расположения предприятий Госкорпорации «Росатом». В 2023 году оценки выполнены для Нововоронежской АЭС, Кирово-Чепецкого отделения Приволжского филиала ФГУП «РАДОН» и АО «АЭХК». Для каждого предприятия по итогам работ совместно с ФГБУ «Гидроспецгеология» и Научно-исследовательским институтом проблем экологии подготовлены информационные геоэкологические пакеты, отражающие экологическую, метеорологическую, санитарно-эпидемиологическую и радиационную обстановку.

Полученные оценки продемонстрировали пренебрежимо малый вклад современной деятельности предприятий атомного энергопромышленного комплекса в г. Ангарске, г. Кирово-Чепецке и г. Нововоронеже в общую структуру техногенного риска.

Результаты работ использованы при оценке безопасности на предприятиях в том числе при реализации федерального проекта «Чистый воздух» в г. Ангарске и планировании работ по исследованиям радиационной обстановки в районе расположения Кирово-Чепецкого отделения Приволжского филиала ФГУП «РАДОН».

4. Проект сбалансированного ядерного топливного цикла — оценки долговременной безопасности ПЗРО

В рамках работы над сбалансированным ЯТЦ разработан концептуальный проект типового ПЗРО для захоронения РАО, образующихся в рамках жизненного цикла АЭС с двумя блоками ВВЭР-1200, включая РАО от переработки ОЯТ в виде короткоживущей фракции ВАО (КФ ВАО) (рис. 2.2.19), оценены объёмы РАО, приведённых к критериям приемлемости для захоронения, выполнена детализированная оценка долговременной безопасности (ОДБ) по результатам которой подготовлен отчёт по обоснованию безопасности (ООб) типового ПЗРО.

При проведении оценки долговременной безопасности рассмотрены возможные особенности, события и процессы (ОСП) природного и техногенного происхождения, влияющие на эволюцию, проанализированы причинно-следственные связи и установлены корреляции между ОСП, определены возможные пути поступления радионуклидов в окружающую среду и пути их воздействия на человека. Разработаны следующие типы сценариев:



Рис. 2.2.19 – Концептуальный проект ПЗРО

- Сценарий нормальной эволюции (СНЭ), предусматривающий эволюционное протекание всех процессов, в том числе утрату защитных функций ИББ в результате естественной деградации по истечении срока службы и выход радионуклидов из РАО в результате взаимодействия инженерных конструкций с подземными водами.
- Альтернативные сценарии эволюции (семь сценариев), предполагающие маловероятные события, способные вызвать (в том числе катастрофические) внешние воздействия природного и техногенного характера на площадке ПЗРО.

Проведённая в рамках ОДБ сценарная оценка продемонстрировала, что безопасность типового ПЗРО обеспечивается на весь период потенциальной опасности размещаемых на захоронение радионуклидов, содержащихся в РАО, с учётом потенциально негативных предположений и допущений для всех рассмотренных сценариев эволюции.

Суммарное потенциальное дозовое воздействие от ПЗРО на население не превышает:

- для сценария нормальной эволюции — **100** мкЗв/год;
- для альтернативных сценариев, с учётом всех наиболее неблагоприятных эволюционных факторов — **500** мкЗв/год;
- для альтернативных сценариев, связанных с непреднамеренным вторжением человека в систему захоронения РАО — **1** мЗв/год.

КЛЮЧЕВЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАБОТ

1. Boldyrev, K. A., Kapurin, I. V., Safonov, A. V., Karaseva, Y. Y., Blinov, P. D., Tyupina, E. A., & Zakharova, E. V. Strontium transport modeling in high-concentrated nitrate solution in DEEP liquid radioactive waste repository // *Journal of Contaminant Hydrology*, 2023, 256, 104172.
2. Kapurin, I. V. Particle tracking for face-based flux data on general polyhedral grids with applications to groundwater flow modelling // *Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling*, 2023, 38(3), p. 115–126.
3. Kizub, P. A., Blokhin, A. I., Blokhin, P. A., Mitenkova, E. F., Mosunova, N. A., Kovrov, V. A., ... & Rakhmanova, O. R. Criticality analysis of pyrochemical reprocessing apparatuses for mixed uranium-plutonium nitride spent nuclear fuel using the MCU-FR and MCNP program codes // *NuclearEngineeringandTechnology*, 2023, 55(3), p. 1097–1104.
4. Линге И. И., Уткин С. С. О глубинном захоронении радиоактивных отходов и радиоэквивалентном подходе к их захоронению // *Ядерная и радиационная безопасность*, 2023, 2(108) с. 42–56.
5. Anuprienko, D., Svitelman, V. Explaining breakthrough behaviour in shale rock: influence of capillary effects and geomechanics // *Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling*, 38(6), p. 341–351.
6. Григорьев, Ф. В. Моделирование течения жидкости в трещиновато-пористой среде на основе модели дискретных сетей трещин и матрицы // *Математическое моделирование*, 2024, — 36(2), — С. 113–128.

Также опубликовано более 20 работ в журнале «Радиоактивные отходы».



СТРАТЕГИЧЕСКОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ И ПРОЕКТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ В ОБЛАСТИ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ



заведующий отделом

С. В. Антипов

д.т.н

(santipov@ibrae.ac.ru)

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ в 2023 году

- 1 ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
- 2 ДОЛГОСРОЧНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ И РЕАЛИЗАЦИЯ МЕРОПРИЯТИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ОРГАНИЗАЦИЙ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

ОСНОВНЫЕ ИТОГИ 2023 ГОДА

1. Исследование радиэкологических проблем Арктической зоны РФ

В рамках гранта РФФИ №20-19-00615 от 25.05.2020 г. разработана новая физическая модель переноса радионуклидов между приводным слоем атмосферы, снегом и морским льдом (АЛО) и усовершенствованы процедуры расчета переноса радионуклидов между морским льдом и океаном.

Новый алгоритм квазидвухфазного приближения переноса частиц в системе АЛО позволил избежать вычислительно затратных обменов массивами лагранжевых частиц между средами через формат SMF3.0, необходимости модернизации модели льда CICE 5.1 для поддержки переноса радионуклидов в трёхмерном пространстве и минимизировать дополнительные обмены между моделями льда CICE 5.1 и океана ИВМИО4.1.

Компьютерная модель воздействия радиационного загрязнения океана на биоту подготовлена в виде хранимой процедуры в базе данных.

Серией вычислительных экспериментов проведена настройка параметризации осаждения радионуклидов на морское дно и их вторичного вовлечения в перенос течениями. Также проведены работы по оптимизации процедуры передачи данных в рамках Лагранжевой модели путём уменьшения размера структур, описывающих частицы. Процедура переноса частиц оперирует в полулогическом (вычислительном) пространстве координат S . Для перехода из физического пространства P в полулогическое S в модели используется отображение, эквивалентное линейной интерполяции величины внутрь ячейки. Реализация процедуры интерполяции вектора скорости в алгоритме переноса модели ИВМИО была

уточнена формулой масштабирования. В результате это не привело к заметному влиянию на скорость расчётов в рамках существующей модели Арктики.

Предложен алгоритм прогноза состояния частиц путём организации нескольких структур данных, включающих: массив всех частиц, участвующих в расчётах (глобальный массив); связный список частиц, присутствующих в локальном вычислительном домене; связный список частиц, покидающих текущий расчётный домен. Реализация нового подхода к передаче состояния частиц в глобальный массив позволила сократить время инициализации лагранжевой модели Арктики с десятков минут до нескольких минут. Разработанная ранее модель переноса радионуклидов в Арктике теперь позволяет учитывать до 10 млн частиц.

Анализ влияния расстановки датчиков-измерителей на точность прогнозов состояния океана показал, что метод Concrete Autoencoder дает наилучший результат для расстановки измерителей, в том числе быструю сходимость физических полей к состоянию контрольного эксперимента и наименьшему значению среднеквадратичной ошибки.

Для повышения эффективности системы ПАРРАД (прогноз рассеяния пассивной примеси в приземном слое атмосферы и загрязнение окружающей среды) разработан механизм моделирования выпадений радиоактивных веществ (аэрозолей) на подстилающую поверхность с различными параметрами шероховатости в разнородной по топографии местности, которые являются входными данными для модели WRF-ARW, что важно применительно к условиям Арктики. В том числе обоснован аналитический способ определения зависимости скорости сухого осаждения радиоактивных аэрозолей от размера и плотности частиц, а также условий взаимодействия воздушного потока с различными типами поверхностей на основе натурных данных. Проведён анализ используемых в модели WRF-ARW данных в диапазоне размеров аэрозолей от 0,001 до 1000 мкм с плотностью частиц 1—5 г/см³. Проведено численное моделирование сухого осаждения аэрозольных частиц на подстилающих поверхностях, характерных для арктического региона, и оценена зависимость его скорости от указанных параметров. Установлены тенденция и динамика изменения спектра размеров аэрозолей в радиоактивном облаке по мере его удаления от источника.

Разработана модель сухого осаждения аэрозольных частиц для чисел Шмидта (Sc) $\gg 1$, основанная на аддитивной зависимости от скорости гравитационного осаждения и динамической скорости с учетом экспериментально определённых параметров. Для расширения области применения модели она доработана введением показателя, учитывающего как физико-химическое сцепление аэрозолей с поверхностью, так и механическую, вследствие шероховатости поверхности, задержку при переносе аэрозолей ветром.

Для адаптации модели ПАРРАД к условиям порта Сабетта проведён прогноз поля ветра и ледовой обстановки для нескольких гипотетических событий (по два выброса радионуклидов на север и восток в летний и зимний периоды). Для их условий проведены тестовые расчеты с модельным выбросом ¹³⁷Cs и ¹³¹I на высоту 70 м. Получены оценки полноты воспроизведения полей радиоактивного загрязнения п-ва Ямал, Обской губы и Карского моря вплоть до фона и собственно поля радиоактивного загрязнения при их переносе в северном и восточном направлениях (рис. 2.2.20—2.2.21).

2. Долгосрочное планирование и реализация мероприятий по повышению радиационной безопасности организаций Российской академии наук

На основании информации, систематизированной в разработанной специальной базе данных по проблемам РБ на объектах РАН, оценочной стоимости их решения и приоритетности выполнения в 2023 году работы, проводились в 8 институтах, расположенных в Москве, Обнинске, Апатитах, Севастополе, Новосибирске, Екатеринбурге и Владивостоке.

По результатам организации и выполнения работ по повышению радиационной безопасности объектов РАН, подведомственных Минобрнауки, было принято решение о включении в вышеупомянутую базу данных по проблемам РБ объектов высшей школы, использу-

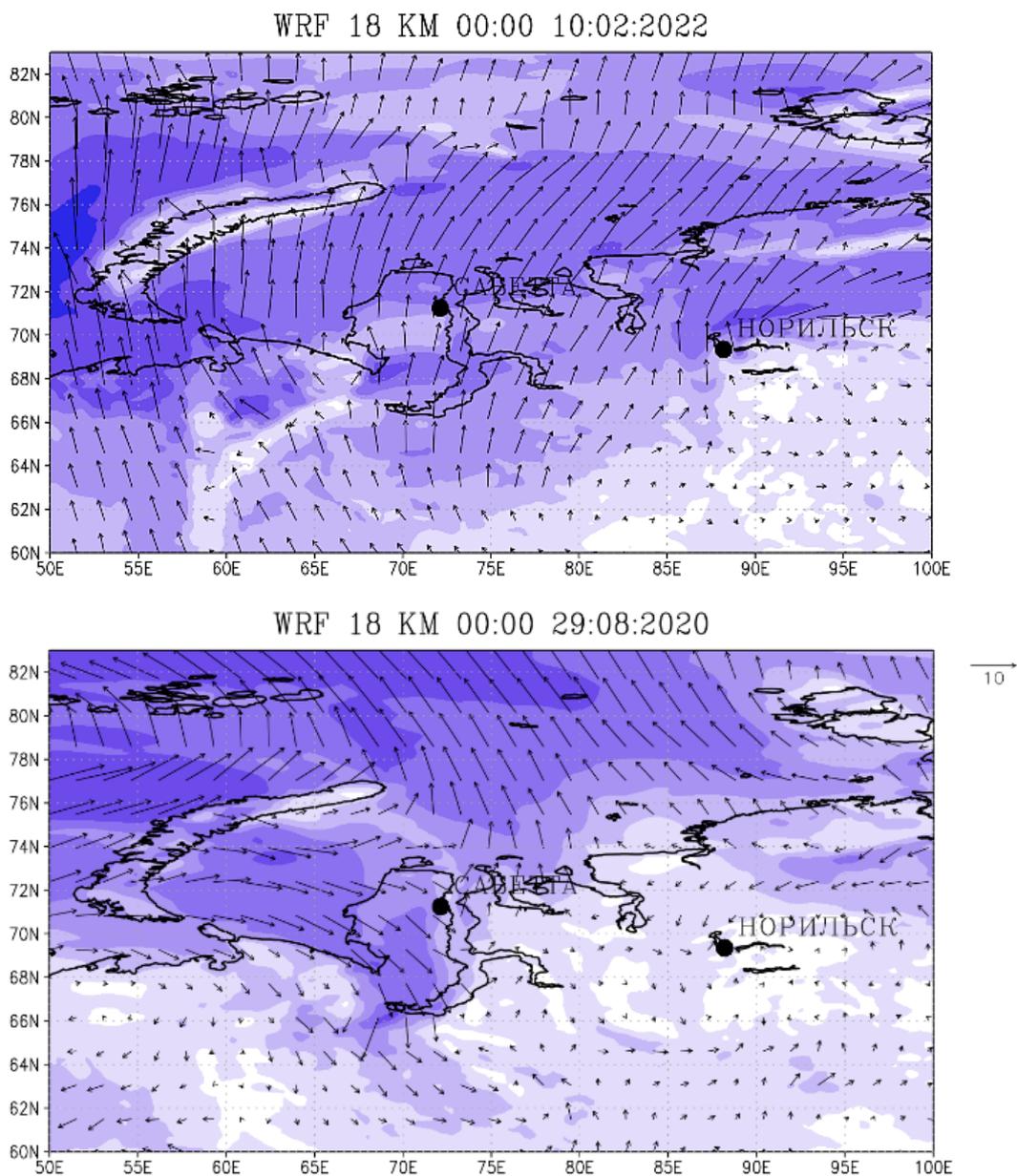


Рис. 2.2.20 — Карты прогноза поля ветра с преобладанием северного и переменного направлений переноса воздушных масс в районе порта Сабетта

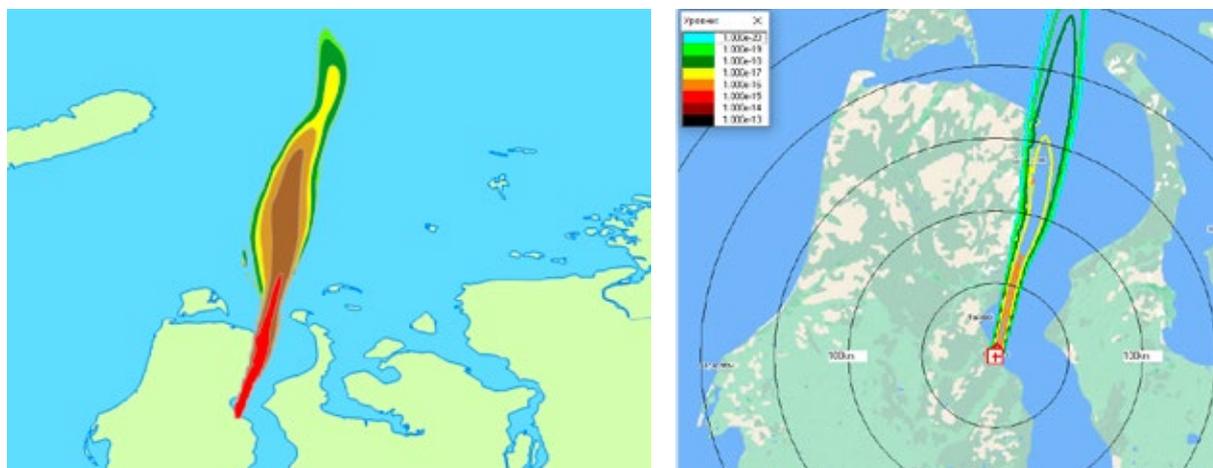


Рис. 2.2.21 — Моделирование и прогноз плотности выпадения ^{137}Cs до 1000 км и ^{131}I до 250 км, лето, северное направление переноса, источник 10^{17} Бк (п-в Ямал, порт Сабетта)



Рис. 2.2.22 — Проведение РО в помещении №1 для хранения ИИИ, РВ и РАО подвала корпуса «К» в ИВТЭ УрО РАН



Рис. 2.2.23 — Г.Э. Ильющенко, с.н.с. ИБРАЭ РАН, при осмотре системы спецвентиляции помещений изотопного блока радиобиологического корпуса ФИЦ ИнБЮМ

ющих радиоактивные вещества и источники ионизирующего излучения, с целью выявления, систематизации и решения накопившихся проблем в данной области в рамках ФЦП ЯРБ. Начата работа по сбору, анализу и систематизации необходимой информации для планирования объёмов и сроков неотложных работ.

По итогам 2023 года в 4 организациях РАН (ФИЦ ИнБЮМ, ГНЦ РФ-ИМБП РАН, ИК СО РАН, ФИЦ КНЦ РАН) приведены в соответствие требованиям федеральных норм и правил в области использования атомной энергии ряд помещений для работы с радиоактивными веществами и радиоактивными отходами.

По четырём объектам выполнены следующие работы:

- в ВНИИРАЭ — по восстановлению системы спецвентиляции (заменены 6 вентагрегатов);
- в ИФХЭ РАН — по восстановлению системы спецканализации и модернизации системы радиационного и дозиметрического контроля;
- в ТИБОХ ДВО РАН – по модернизации систем физической защиты в лаборатории физико-химических методов исследования;
- в ИВТЭ УрО РАН — КИРО части помещений.

КЛЮЧЕВЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАБОТ

1. Саркисов А.А., Антипов С.В., Высоцкий В.Л., Дзама Д.В., Биладенко 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, — Т. 133, — Вып. 4, — С. 229–238.

2. Антипов С.В., Тананаев И.Г. Радиозоологические проблемы Арктической Зоны Российской Федерации: причины возникновения, современное состояние, перспективы //Радиохимия, 2023, — Т. 65, — № 2, С. 1–17.

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 1999 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



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** 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

ОСНОВНЫЕ ИТОГИ 2023 ГОДА

1. Разработка расчётных методов, алгоритмов и подходов для обеспечения сквозного моделирования протекания и прогнозирования последствий тяжёлых запроектных аварий на АЭС (Киселев А.А., Филиппов М.Ф., Акимова И.Г.)

Разрабатываемые в ИБРАЭ РАН в данной области расчётные методы, алгоритмы и подходы имеют следующие важные преимущественные характеристики по сравнению с существующей практикой:

- единый (сквозной) расчёт от аварийного события до дозовых нагрузок с возможностью оперативного внесения изменений (в процессе выполнения расчёта), вызванных уточнением и быстрым изменением фактических исходных данных об аварии, инициирующих исходных событиях, данных об эксплуатационном состоянии энергоблоков, наложением дополнительных отказов и действий оператора;
- прогноз переноса РВ в атмосфере и доз на население в зонах вокруг аварийного блока АЭС, потенциально подверженных радиоактивному загрязнению, на основе прогноза источников выбросов РВ и метеополей. При расчёте учитываются орография, типы подстилающей поверхности и индексы листовой поверхности в зависимости от сезона с учётом периодов вегетации;
- прогноз метеополей в зонах вокруг аварийного блока АЭС, потенциально подверженных радиоактивному загрязнению, с заблаговременностью до 7 суток от даты сообщения об аварийной ситуации;
- ансамблевый подход как принципиальная методическая основа расчёта источников выбросов РВ, метеополей и доз на население. Ансамблевый подход позволяет учесть неопределённости, являющиеся внутренне присущей характеристикой любых расчётов. В задачах аварийного реагирования учёт неопределённостей приобретает критически важное значение, поскольку речь идёт о защите населения;

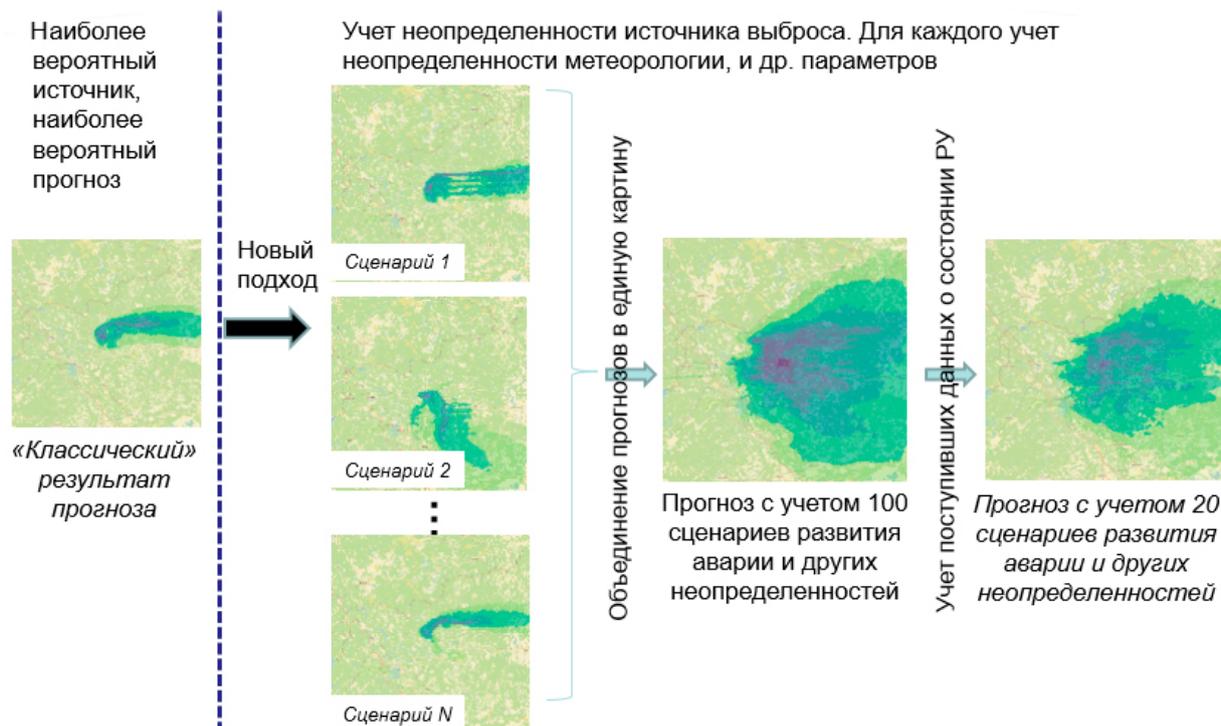


Рис. 2.3.1 — Новый подход для обеспечения сквозного моделирования протекания и прогнозирования последствий тяжёлых запроектных аварий на АЭС для задач аварийного реагирования

- источниками неопределённости расчёта дозовых нагрузок являются неопределённость прогноза источников РВ, неопределённости прогноза метеополей, неопределённости входных параметров модели атмосферного переноса. Анализ неопределённостей выполняется методом трансформирования распределений входных параметров при прохождении через модель атмосферного переноса. Принимая во внимание нелинейный характер функциональных зависимостей, для учёта неопределённостей используется метод Монте-Карло, то есть, ансамблевый подход требует проведения большого количества многовариантных расчётов. Когда неопределённостями можно пренебречь, ансамблевый подход может сводиться к проведению одного расчёта, как в традиционных методиках;
- учёт нескольких источников РВ, разнесённых по времени и высотному положению, возникающих при развитии одного сценария ТА (расчёт последствий многоблочных аварий);
- автоматизированная статистическая обработка набора пространственных распределений дозовых нагрузок, получаемых в результате применения ансамблевого подхода с получением пространственного распределения доз вокруг АЭС в терминах статистик и вероятностей превышения пороговых дозовых характеристик.

2. Совершенствование методического и программного обеспечения отраслевой системы мониторинга радиационной обстановки (Бакин Р.И., Киселев А.А., Красноперов С.Н.)

Работы проводились по двум основным направлениям:

- нормативное обеспечение радиационного мониторинга (РМ) в районах расположения ОИАЭ Госкорпорации «Росатом»;
- программное (расчётно-моделирующее) обеспечение РМ в районах расположения ОИАЭ Госкорпорации «Росатом».

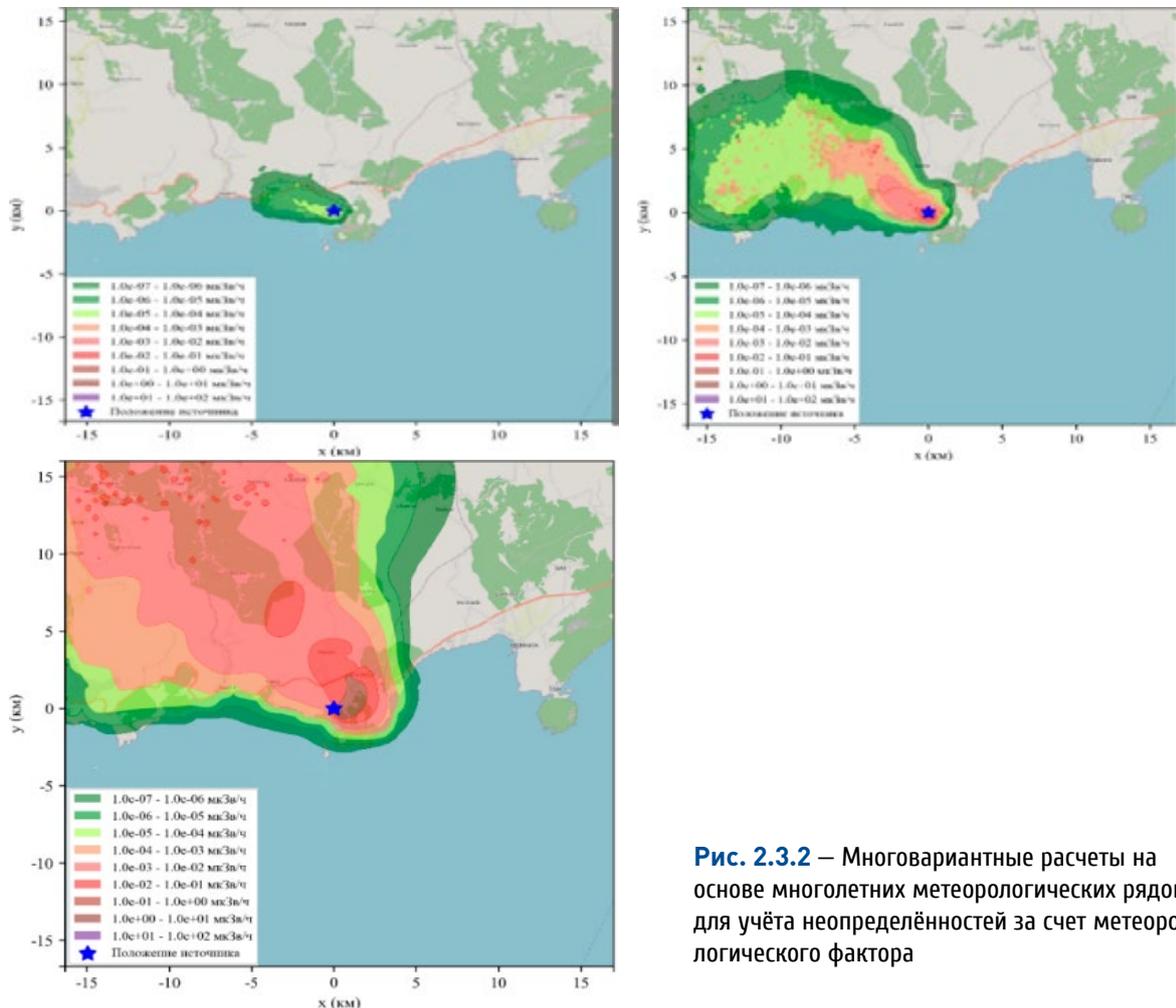


Рис. 2.3.2 — Многовариантные расчеты на основе многолетних метеорологических рядов для учёта неопределённости за счет метеорологического фактора

По первому направлению нормативно обосновано использование расчётных методов при проведении РМ в районах расположения ОИАЭ Госкорпорации «Росатом». В частности, для радиационного мониторинга атмосферного воздуха и выпадений предложена схема зонирования для инструментального и расчётного мониторинга, а для оптимизации расположения постов радиационного мониторинга наземных природных и аграрных экосистем — использование расчётных полей радиоактивных выпадений.

Преимущества расчётного метода с использованием данных мониторинга источника выброса/сброса и соответствующих моделей наряду с инструментальными методами с применением средств отбора и измерения проб (расчёты и измерения дополняют друг друга):

- такой метод более информативен, обеспечивается разделение существующего загрязнения объектов окружающей среды и загрязнения, обусловленного текущей эксплуатацией ОИАЭ;
- есть возможность оценить вклад каждого источника выброса ОИАЭ в радиоактивное загрязнение любого необходимого объекта окружающей среды и в дозы на население;
- при оценке доз на население учитываются все пути поступления радионуклидов;
- обеспечивается возможность оценить радиационное воздействие каждого источника выброса ОИАЭ за любой интервал времени от одних суток до десятков лет.

Одновременно с нормативным обеспечением проводилась работа по совершенствованию программного обеспечения (ПО). В основу ПО заложено использование многовариантных расчётов на основе многолетних метеорологических рядов для учёта неопределённостей за счёт метеорологического фактора. Такой подход пришел на смену устаревших подходов, связанных с проведением расчёта атмосферного переноса по осреднённым за несколько лет метеорологическим данным. В этом случае становится возможным учитывать неоднородную пространственную и временную структуру атмосферных течений, которая неразрывно связана с климатическими особенностями географического положения площадки размещения ОИАЭ. Такой подход отвечает самым современным международным требованиям в области расчётной оценки степени воздействия атмосферных выбросов ОИАЭ на население (как при нормальной эксплуатации, так и при аварийных ситуациях).

3. Разработка подходов к имитации автоматизированных систем контроля радиационной обстановки (Антоний Е.В., Акимова И.Г., Нистратов М.Ю.)

С целью повышения уровня эффективности аварийного реагирования и радиационной защиты персонала и населения в случае возникновения радиационной аварии на ОИАЭ разрабатываются подходы к имитационному моделированию радиационной обстановки на ОИАЭ и в районе их расположения для проведения противоаварийных тренировок и учений.

Основной задачей при этом является моделирование радиационной обстановки в помещениях объектов, на промплощадке и в зоне расположения постов АСКРО для аварий различной феноменологии и динамики протекания со следующими характеристиками:

- основными моделируемыми величинами являются МЭД, плотность радиоактивных выпадений, концентрация радиоактивных веществ, в том числе учитываются вклады в мощность дозы от подстилающей поверхности;
- для расчёта мощностей доз использованы приближения, учитывающие облучение под проходящим облаком вблизи от источника приподнятого выброса, где приземные концентрации близки к нулю;
- обеспечена возможность моделирования радиационной обстановки на основании метеорологических данных и специфических особенностей площадки ОИАЭ при кратковременных радиоактивных выбросах в аварийных ситуациях;
- обеспечена возможность имитации результатов радиационной разведки на промплощадке и в районе расположения АЭС с вариантами задания маршрутов радиационной разведки;

- обеспечена возможность корректировки имитационных данных непосредственно в процессе моделирования (можно выполнить автоматический перезапуск процесса моделирования с новыми исходными данными, например, с новыми параметрами выброса или метеоданными);
- результаты имитационного моделирования могут представляться на картографической основе в виде изолиний / полигонов между изолиниями в соответствии с заданной легендой, а динамика изменения функций (мощности дозы, например) в интересующих точках — в виде графика.

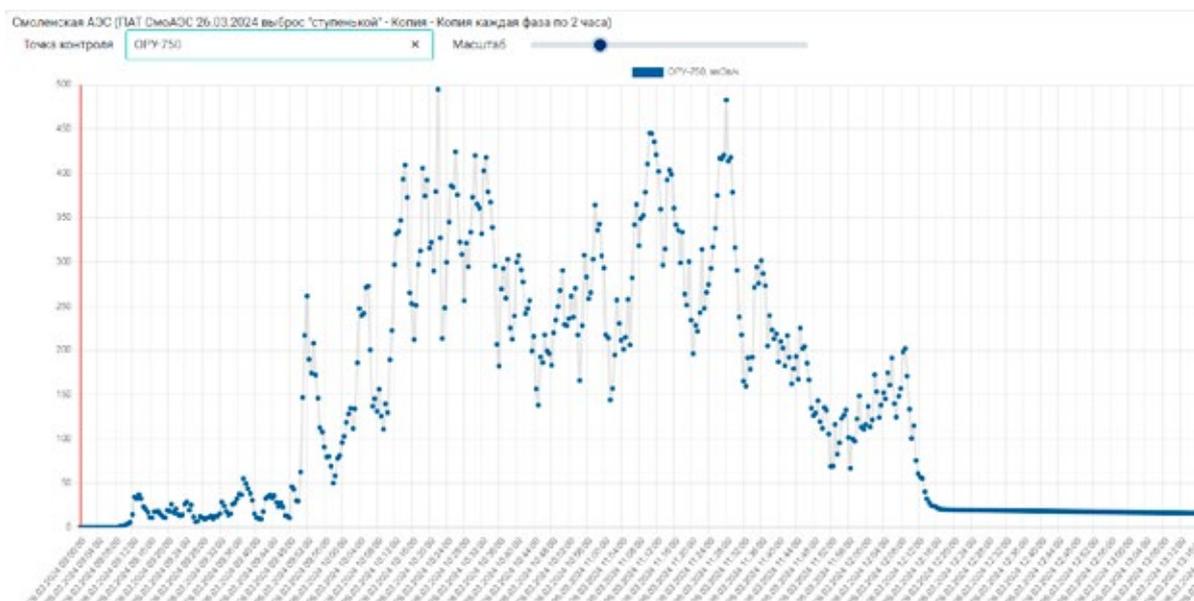


Рис. 2.3.3 — Пример возможной экранной формы с имитацией показаний данных АСКРО при условном аварийном выбросе на АЭС

4. Развитие средств и методов моделирования мощности дозы и отклика средств измерений, используемых для радиационного мониторинга (Шведов А.М., Арон Д.В.)

По результатам проведённых работ были решены следующие задачи:

- созданы программные средства и реализованы алгоритмы, позволяющие производить моделирование отклика детекторов, а также производить на их основе оценки плотности потока и мощности дозы гамма-излучения в точке расположения детектора от протяжённых в пространстве источников на больших расстояниях от них с использованием локальных оценок с применением современных программных средств моделирования переноса излучения по методу Монте-Карло. Локальные оценки являются разновидностью приближения результата для численных методов решения задач переноса излучения, позволяющие значительно сократить длительность машинного времени вычислений при сохранении высокой достоверности оценки;
- с помощью расчётного моделирования получены данные, позволяющие осуществлять преобразование аппаратных спектров сцинтилляционного детектора NaI(Tl) (Ø31x31 мм) аэрогаммаспектрометрического комплекса в значения мощности дозы гамма-излучения. Также получены оценки неопределённостей применения рассчитанных пересчетных коэффициентов от аппаратного спектра в мощность дозы, обусловленных использованием приближения облучения детектора в геометрии плоскопараллельного потока гамма-излучения для условий аэрогаммасьёмки.
- сформирована база данных функций отклика сцинтилляционных детекторов на основе кристалла NaI(Tl) с размерами от Ø31x31 до Ø76x76 мм. Функции отклика были получены с помощью метода Монте-Карло в приближении геометрии гамма-облучения детектора плоскопараллельным потоком частиц. База данных содержит функции отклика

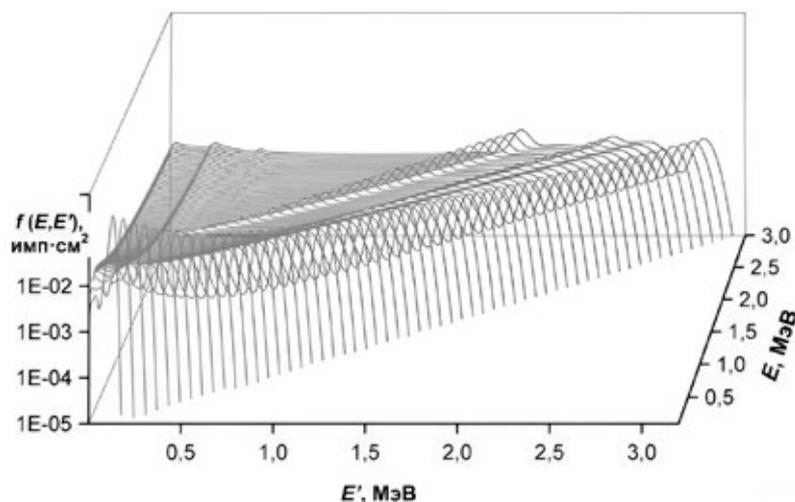


Рис. 2.3.4 – Функция отклика детектора NaI(Tl) Ø31x31 в составе аэрогаммаспектрометрического комплекса, нормированная на единицу плотности потока гамма-излучения

на плотной сетке (с шагом 1 кэВ) в диапазоне от 100 до 3000 кэВ по энергии источника излучения. Смоделированные аппаратные спектры, составляющие функции отклика, также приведены на сетке с шириной энергетической группы (ценой канала спектрометра) 1 эВ. База также включает в себя алгоритмы обработки содержащихся данных с целью обеспечения возможности их использования для спектрометров с любым разрешением по энергии, для любой цены канала спектрометра, а также позволяют получать кривые зависимости эффективности регистрации излучения от энергии (полной эффективности либо по пику полного поглощения гамма-кванта). В качестве примера на рисунке рис. 2.3.4 ниже приведена функция отклика детектора в составе разработанного в ИБРАЭ РАН аэрогаммаспектрометрического комплекса.

В целом проведённые работы направлены на моделирование и интерпретацию функции отклика детектора гамма-излучения для различных источников излучения, геометрий излучения для широкого спектра размеров самого детектора. Невозможность решения задач такого рода аналитическими методами приводит к необходимости наработки баз данных моделируемых откликов детекторов различных габаритов. Сформированные базы данные откликов детектора, полученные с применением метода Монте-Карло, представляют собой набор численных решений задачи по имитации измерения потоков гамма-частиц, что позволяет не использовать в дальнейшем реальные детекторы излучения и производить численное моделирование условий проведения измерений в различных условиях.

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.)

В рамках обеспечения расширения возможностей создания территориальных систем контроля радиационной обстановки проводились работы по разработке постов радиационного контроля на базе защищённых стандартных 10-футовых контейнеров.

Для повышения надёжности функционирования в условиях труднодоступности и суровых климатических условий пост контроля оборудуется тремя блоками детектирования мощности дозы гамма-излучения и блоком обработки и передачи данных специального исполнения, а также комплектом ЗИП. В совокупности эти технические решения позволяют многократно повысить надёжность измерительной системы.

Опционально может быть установлена автоматическая метеостанция российского производства для контроля метеопараметров и установка для контроля объёмной активности воды.

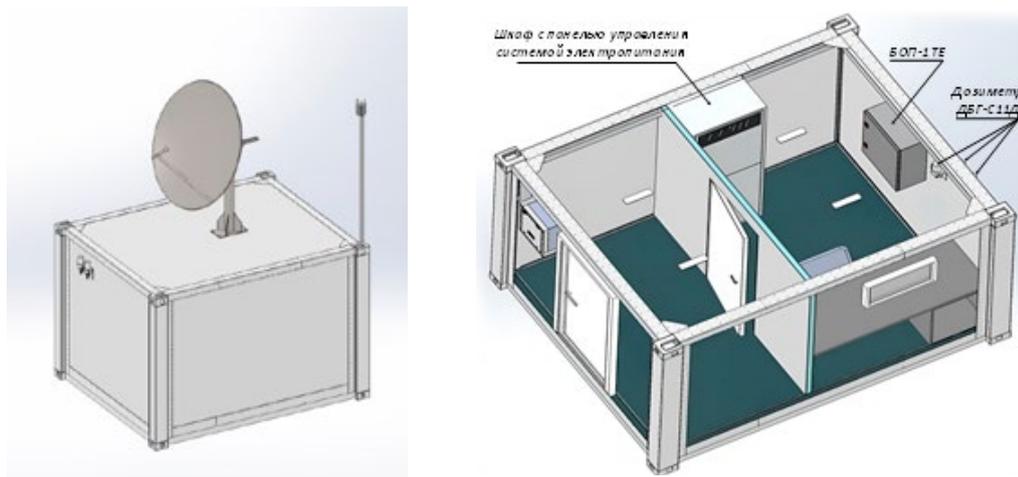


Рис. 2.3.5 – Трёхмерные модели одного из вариантов автономного поста радиационного контроля (схема расположения оборудования в контейнере)

Для обеспечения связи на крыше поста предусмотрена возможность установки спутниковой антенны диаметром до 1,8 метра.

Метеостанция устанавливается на специально отведённой для этого мачте.

Пост радиационного контроля имеет в своём составе следующие системы жизнеобеспечения: электропитания, освещения, пожарной сигнализации, а также средства пожаротушения.

КЛЮЧЕВЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАБОТ

1. A. Kiselev, A. Osadchiy, A. Shvedov, V. Semenov. Ensemble of Below-Cloud Scavenging Models for Assessing the Uncertainty Characteristics in Wet Raindrop Deposition Modeling // *Atmosphere*, 2023, 14(2), 398, Q2.
2. Киселев А.А. Принципы вариантного моделирования в коде RELTRAN для задач прогнозной оценки доз облучения населения при выполнении планируемых работ по выводу из эксплуатации ОИАЭ // *Известия Российской академии наук. Энергетика*, 2023. – № 4. – С. 54–65.
3. Киселев А.А. Сравнительный анализ размеров зон планирования защитных мероприятий для двух гипотетических радиационных аварий // *Ядерная и радиационная безопасность*, 2023. – № 3 (109). – С. 36–49.
4. Kiselev, A.A. Analysis of the national and international framework for the EPZ establishment including harmonization and applicability for next generation reactors // *Nuclear Engineering and Design*, 414, 112655, Q1.
5. Konstantin G. Rubinshtein, Inna M. Gubenko. Impact of Thunderstorm Location Data Assimilation on Numerical Weather Forecasting // *Journal Of Atmospheric And Oceanic Technology*, 2023, 40, 253–263, Q2.
6. Бутаков Н.Ю., Рубинштейн К.Г. Прогноз температуры поверхности моря и приземной температуры воздуха по совместной модели «океан – атмосфера» для региона Белого моря в летний период // *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*, 2023. – № 1 (387). – С. 67–86.

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**

ОСНОВНЫЕ ИТОГИ 2023 ГОДА

1. Обеспечение водородной взрывобезопасности

1. С помощью ПрЭВМ CABARET-SC1 выполнен расчётный анализ экспериментов ОЭСР SETH test16 и test17. Исследовались плавучие струи с горизонтальным впрыском пара при температуре 413 К из трубки инжекции, расположенной в нижней части первого сосуда, в объем, первоначально заполненный воздухом при температуре 381 К. В системе поддерживается постоянное давление 0,13 МПа на протяжении всего эксперимента путем стравливания смеси воздуха и пара через патрубков в верхней части второго сосуда. Эксперименты различаются исходным числом Фруда впрыскиваемой струи пара: 2,9 и 4,7 соответственно. Массовый расход впрыскиваемого пара составляет 40 г/с и 65 г/с соответственно.

Для моделирования экспериментов была построена сеточная модель установки PANDA (рис.2.4.1(б)) с количеством ячеек около 1,2 млн. Количество ячеек в сечении входной трубки составило 84 (рис.2.4.1(в)).

На рис.2.4.2 представлено сравнение с экспериментом рассчитанной концентрации пара вдоль оси симметрии первой камеры на разные моменты времени в экспериментах test16 и test17. Для обоих экспериментов получено достаточно хорошее совпадение расчётных и экспериментальных данных по вертикальному распределению концентрации пара.

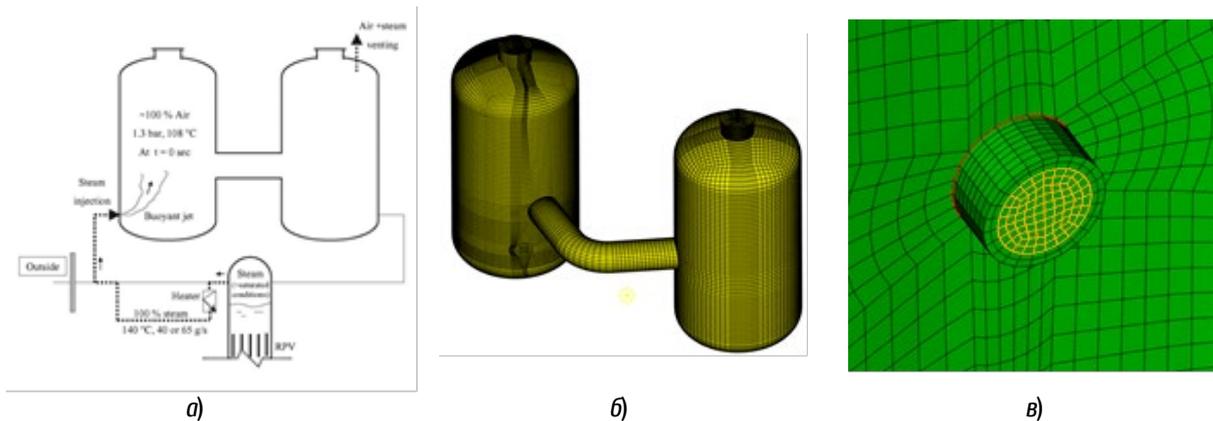


Рис.2.4.1 – а) схема установки, б) сеточная модель, в) сеточная модель в области впрыска пара

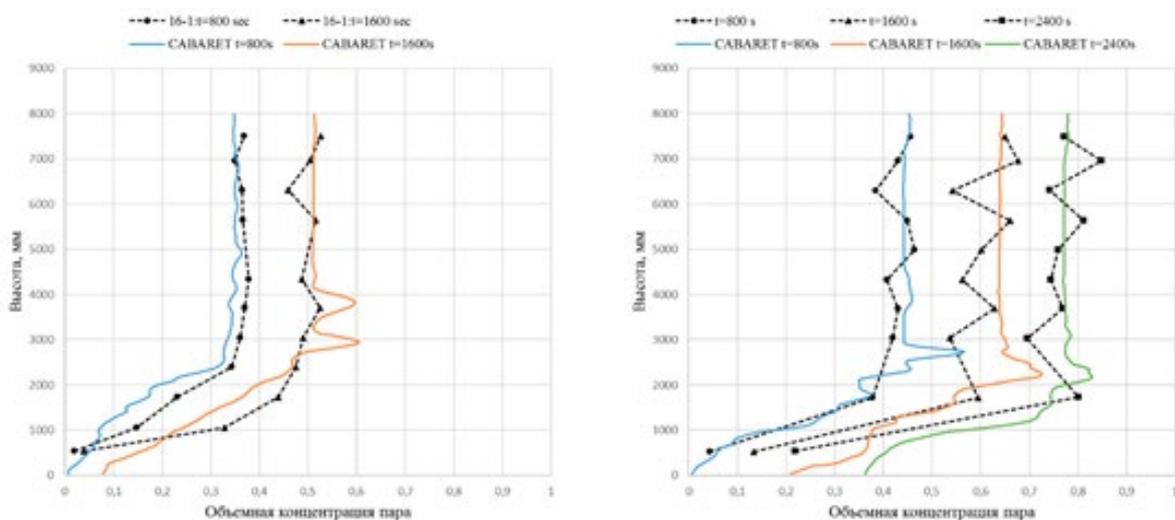


Рис.2.4.2 – Сравнение рассчитанной концентрации пара вдоль оси симметрии первой камеры с экспериментом на разные моменты времени. (а) – test16, (б) – test17

Локальные завышения концентрации пара могут свидетельствовать о недостаточном разрешении, как в области инъекции пара, так и в свободном объёме Сосуда 1.

2. В проекте реактора ИТЭР для защиты первой стенки (ПС) вакуумной камеры (ВК) токамака от эрозии предусмотрена облицовка из бериллия. При работе термоядерного реактора будет происходить распыление материала первой стенки и накопление пыли в ВК. Образующаяся бериллиевая пыль осаждается и накапливается на поверхностях панелей ПС и в зазорах между ними. В аварийных ситуациях, связанных с течами воды из системы охлаждения ПС или дивертора в ВК, поступающий в ВК пар вступает в экзотермическую реакцию с горячими металлическими поверхностями и пылью, сопровождающуюся образованием водорода. Это создаёт опасность взрыва водородовоздушной смеси при выходе водорода за пределы ВК или при поступлении воздуха внутрь ВК. Анализ безопасности термоядерных установок требует численных оценок количества, скорости наработки водорода и состава газовой атмосферы, возникающей при окислении металлических поверхностей, в том числе частиц в пылевых слоях в результате прорыва воды из системы охлаждения в ВК.

Проведена адаптация математической модели процесса окисления накопленной в слоях бериллиевой пыли для ПрЭВМ CABARET-SC1. В основе модели лежит предположение, что лимитирующим процессом при окислении является диффузия окислителя (пара) в пористом пылевом слое. С помощью адаптированной модели был выполнен демонстрационный расчёт в реальной геометрии задачи окисления слоя бериллиевой пыли на поверхностях дивертора ВК. На рис.2.4.3(а) представлена сеточная модель для фрагмента ВК (1/9 часть тора), содержащая 142880 гексаэдральных ячеек. Слой бериллиевой пыли толщиной 2 мм задаётся на поверхностях дивертора в нижней части ВК. В начальный момент времени предполагается, что температура слоя составляет 800 К. Температура подложки (стенок дивертора) принимается постоянной и равной 500 К. Объём камеры заполнен водяным паром при нормальных условиях (вопросы, связанные с конденсацией, не рассматриваются). На рис.2.4.3(б) показана мольная доля водорода в момент времени 20 с. Водород генерируется на поверхностях дивертора в ходе паро-бериллиевой реакции в пылевых слоях и распространяется в верхнюю часть ВК. На рис.2.4.3(в) представлена зависимость от времени для суммарного диффузионного потока пара к зоне реакции.

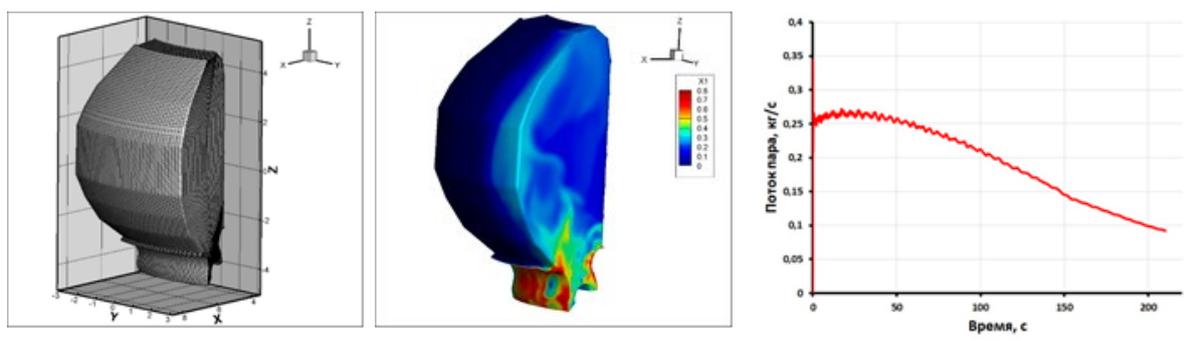


Рис. 2.4.3 – Расчёт задачи окисления слоя бериллиевой пыли на поверхностях дивертора ВК. (а) – сеточная модель фрагмента ВК, (б) – мольная доля водорода, (в) – диффузионный поток пара к зоне реакции

3. С помощью ПрЭВМ CABARET-SC1, в которую включена модель крупномасштабного горения перемешанных горючих газовых смесей, проведён расчёт эксперимента с горением стратифицированной водородно-воздушной смеси на установке FZK A1, представляющей собой прямоугольный канал с препятствиями с открытым дном. Размеры установки составляют 9×1,5×0,9 м. В канале эквидистантно установлены 14 препятствий, которые создают уровень загромождённости BR=0,5. Схема расположения препятствий представлена на рис.2.4.4.

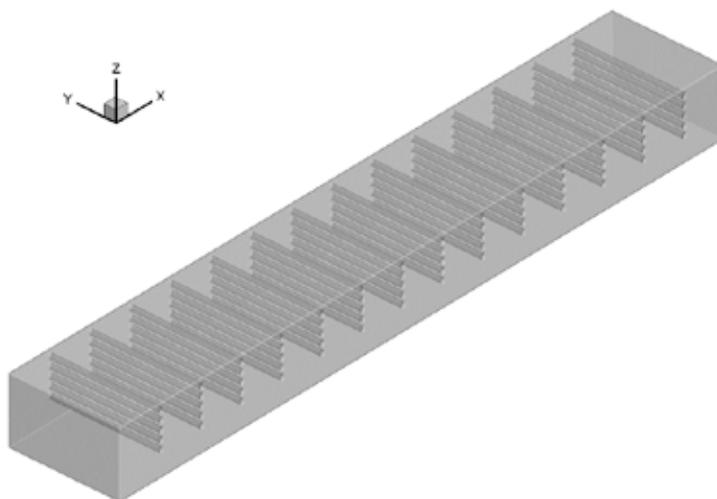


Рис. 2.4.4. — Вид расчётной модели для задачи горения стратифицированной водородно-воздушной смеси в загромождённом полукрытом канале в установке FZK A1

В данном эксперименте установка заполнена водородно-воздушной смесью с положительным градиентом распределения водорода (рис.2.4.5(a)). По другим направлениям смесь считается однородной. На рис.2.4.5(б) сопоставлены динамика скорости фронта пламени вдоль длины экспериментальной установки для расчётов с различным исходным распределением водорода. Рисунки показывают хорошее воспроизведение экспериментальных данных в расчёте. Для более богатой смеси максимальная скорость фронта пламени составляет 350 м/с при максимальной скорости, наблюдаемой в эксперименте, равной 460 м/с. Для более бедной смеси максимальная скорость фронта пламени составляет 92 м/с при максимальной скорости, наблюдаемой в эксперименте, равной 107 м/с.

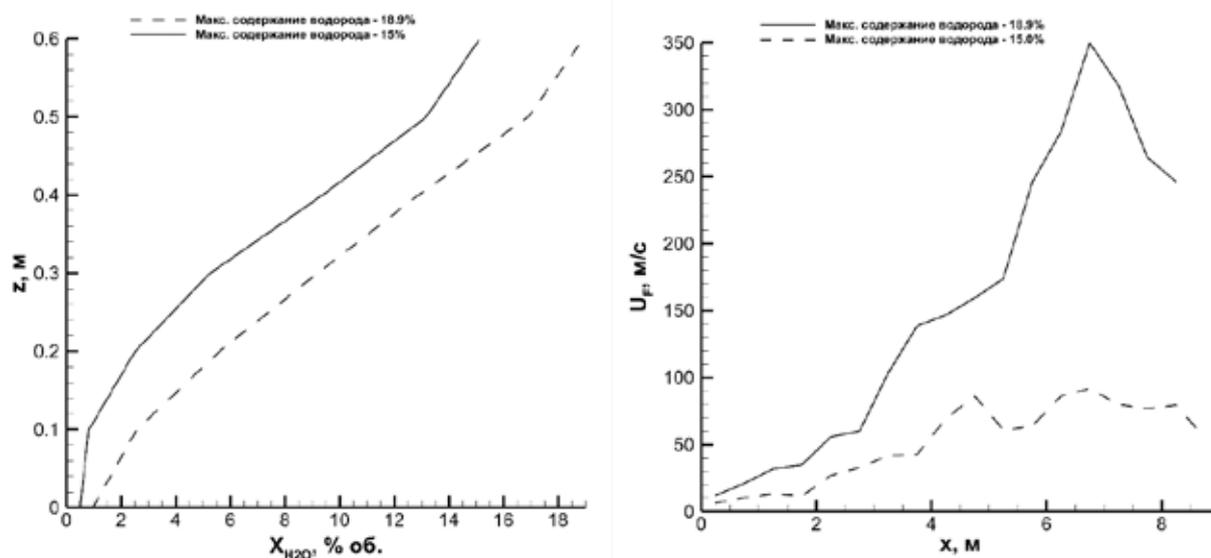


Рис. 2.4.5 — Зависимость начальной концентрации водорода от высоты установки (а); скорость распространения пламени вдоль длины канала (б)

На рис 2.4.6 представлены температуры продуктов горения в плоском канале с препятствиями на различные моменты времени.

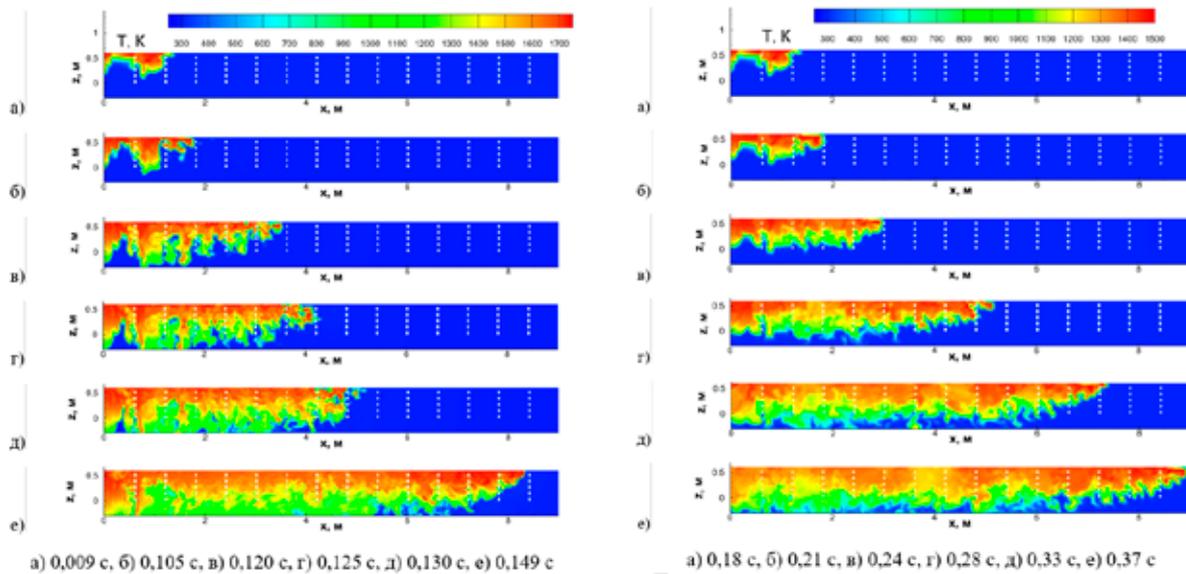


Рис. 2.4.6 – Поля температуры продуктов горения в плоском канале с препятствиями на различные моменты времени; (а) – с максимальной объёмной долей водорода 18,% (б) – 15%

2. Построение численных алгоритмов на основе схемы КАБАРЕ для решения практических задач в водных объектах в приближении мелкой воды

В мировой практике для моделирования различных гидрологических процессов в поймах и руслах рек, каналах, водоёмах проточного типа, а также в прибрежных зонах широко используется приближение мелкой воды. Данные уравнения гиперболического типа описывают законы сохранения массы и импульса и определяют связь между полем течения и изменением глубины воды с учётом гидравлического трения и неровностей рельефа.

В вычислительной гидродинамике, в частности, в теории мелкой воды, нелинейность основных уравнений в сочетании с большим количеством расчётных ячеек (и, следовательно, неизвестных) в сложных задачах требует привлечения больших вычислительных ресурсов. Это определяет интерес к разработке эффективных численных методов.

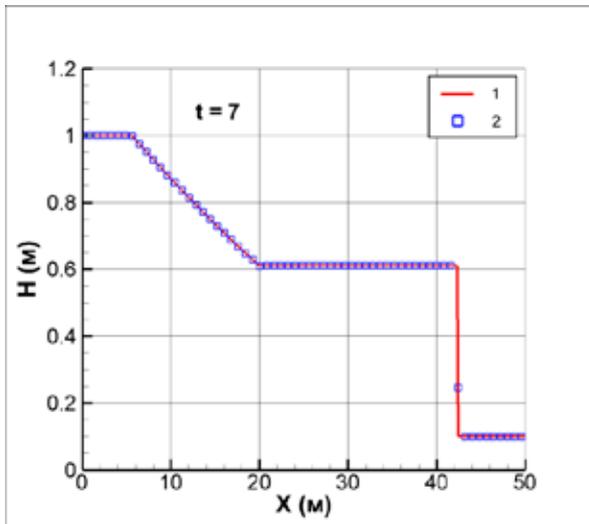
В настоящее время предложен целый ряд методов для численного решения системы уравнений теории мелкой воды. В частности, широкое распространение получили явные методы сквозного счета, принадлежащие классу схем по типу Годунова. Данные разностные схемы, первоначально созданные для решения уравнений газовой динамики, связаны с использованием в качестве составного элемента точного или приближенного решения задачи Римана. Наряду с явными методами, для численного решения систем уравнений мелкой воды, как в одномерном, так и двумерном случаях, также используются неявные методы, направленные на повышение вычислительной эффективности (компромисс между численной устойчивостью и точностью применяемых методов).

При построении численных методов на основе уравнений мелкой воды для решения прикладных задач важным является учет таких свойств, как хорошая сбалансированность схем. Соблюдение этого условия требует от вычислительного алгоритма, чтобы решение задачи с начальными условиями покоящейся жидкости не зависело от времени, т.е. в изначально покоящейся жидкости не должны возникать возмущения, обусловленные неровностями дна.

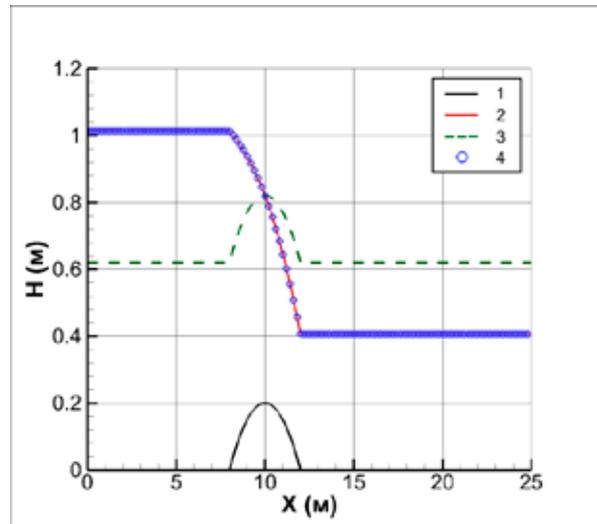
Помимо этого необходимо учитывать возможность сквозного расчёта динамических границ, разделяющих жидкость и сухое дно. Это условие является существенным при решении прикладных нестационарных задач, особенно в прибрежных зонах, где граница, разделяющая области жидкости и сухого дна, постоянно меняется. Дополнительным требованием является возможность проводить такое моделирование на неоднородном рельефе дна.

Для решения подобного рода задач в ИБРАЭ РАН в 2023 году был разработан ряд численных алгоритмов, в основе которых лежит идеология балансно-характеристической схемы КАБАРЕ. Были рассмотрены возможности применения как явных, так и неявных схем КАБАРЕ для численного решения уравнений теории мелкой воды.

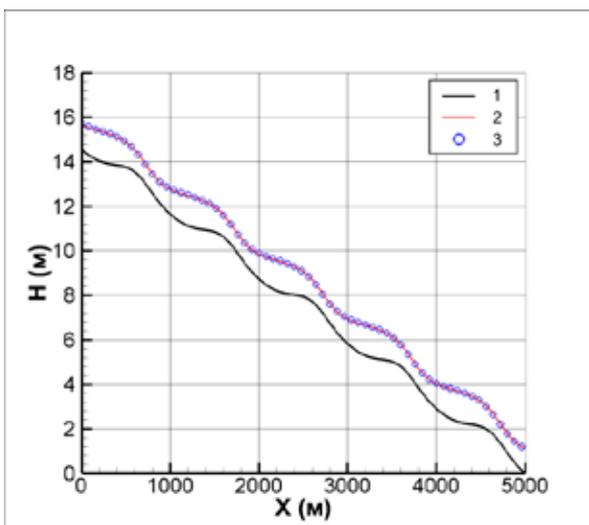
В частности, разработан численный метод на основе явной схемы КАБАРЕ для моделирования в приближении мелкой воды нестационарного течения жидкости на произвольной топографии. Метод обладает условием хорошей сбалансированности, обеспечивая выполнение условия гидростатического равновесия на неровном рельефе дна, и позволяет рассчитывать различные режимы течения. Помимо этого учитывается возможность сквозного расчета динамических границ, разделяющих жидкость и сухое дно, обусловленных процессами затопления и обмеления, а также ряда физических процессов (трение о дно, осадки). Примеры тестовых расчетов приведены на рис. 2.4.7. Описание данных тестов и результаты моделирования подробно представлены в [3]. Все расчёты, представленные на рис. 2.4.7, проводились при числе Куранта-Фридрихса-Леви CFL = 0.3.



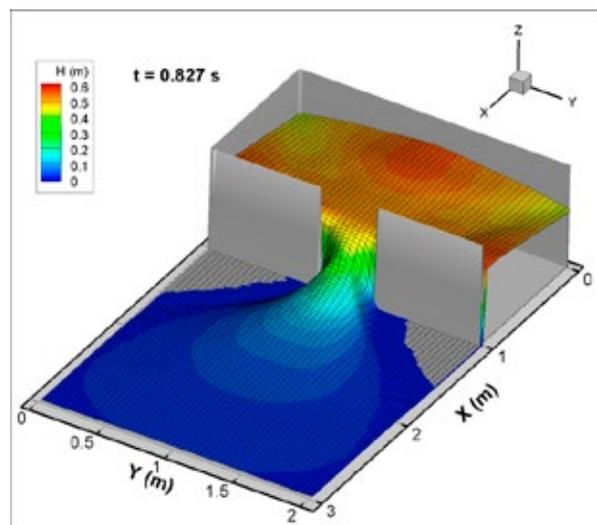
а) Задача о распаде разрыва (левая волна разрежения и правый скачок). 1 – точное решение, 2 – численное решение



б) Тест с обтеканием препятствия. Транскритический поток без скачка. 1 – топография дна, 2 – точное решение, 3 – критическая высота, 4 – численное решение



в) Тест в канале при наличии трения, глубина воды – периодическая функция в пространстве. 1 – топография дна, 2 – точное решение, 3 – численное решение



г) Задача о разрушении двумерной плотины. 3D визуализация моделируемого течения на момент времени $t=0.827$ с.

Рис. 2.4.7 – Примеры тестовых расчетов

Также был разработан новый подход к построению неявных безусловно устойчивых схем в рамках балансно-характеристической методики КАБАРЕ применительно к системе уравнений мелкой воды [4]. Метод основан на идее инверсии координатных осей в явной схеме КАБАРЕ для преодоления ограничения на шаг по времени. Система уравнений является нелинейной, так как в уравнения включены минмаксные операции лимитирования на основе принципа максимума для локальных инвариантов Римана. Такое лимитирование существенно улучшает дисперсионные свойства схемы. Нелинейная система уравнений решается методом бегущего счёта. Примеры тестовых расчётов по данной схеме для задачи о распаде разрыва при разных числа Куранта-Фридрихса-Леви $CFL = 6$ и $CFL = 30$ приведены на рис. 2.4.8.

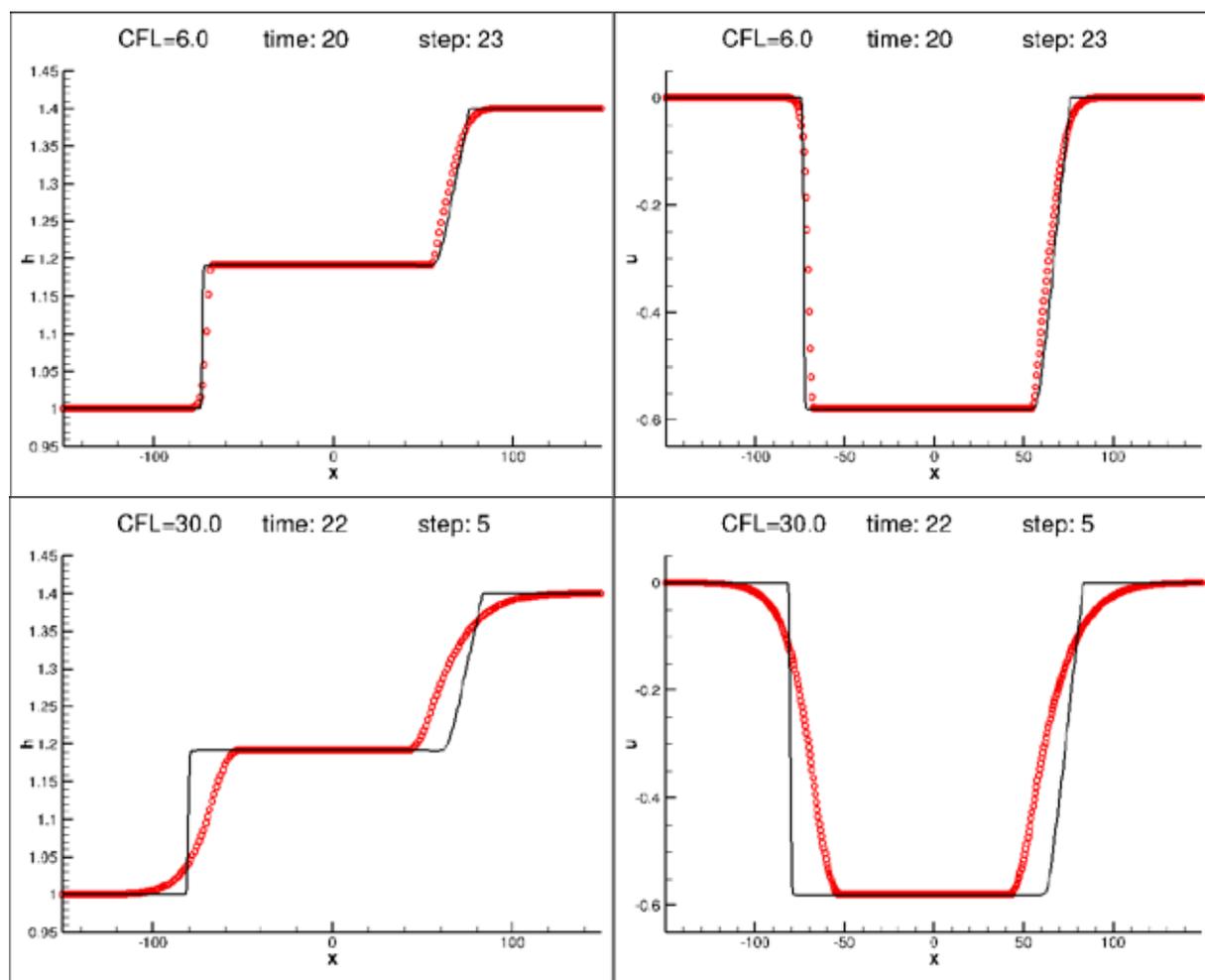


Рис. 2.4.8 – Задача о распаде разрыва (левый скачок и правая волна Римана). Сравнение численного решения по неявной схеме для глубины h и скорости u потока при разных числа Куранта-Фридрихса-Леви (CFL) с точным решением

3. Разработка библиотек одногрупповых сечений для расширенного набора нейтронных реакций, включая высокопороговые реакции

В нейтронно-физических расчетах систем с быстрым спектром ядерно-физические данные при энергии выше 1 МэВ становятся определяющими, что наиболее сильно проявляется при решении задач нуклидной кинетики. Прецизионные расчеты основаны на использовании библиотек одногрупповых сечений с расширенными цепочками переходов, включающих нейтронные реакции (n, d) , (n, t) , (n, nt) , $(n, {}^3\text{He})$, $(n, 3n)$, $(n, 2\alpha)$, $(n, 2p)$, $(n, p\alpha)$, (n, nd) , (n, np) , $(n, 2n\alpha)$, $(n, 3n\alpha)$, $(n, n2\alpha)$ и др.

Расширенные библиотеки формируются на максимально полной базе ядерно-физических данных с включением высокопороговых реакций для всех нуклидов, представленных в современных файлах JEFF 3.3. Традиционные методы подготовки одногрупповых

сечений стандартных (не высокопороговых) реакций не могут с той же надёжностью обеспечить вычисление одногрупповых сечений высокопороговых реакций, что обусловлено неоднозначным представлением ядерных данных в ENDF-6 формате для области энергий 20 МэВ в ENDF файлах (разные версии JFFF, ENDF/B и др.), существенно различающейся зависимостью $\sigma_{mi}(E_j)$ для разных пороговых реакций и др. (рис.2.4.9).

Методика вычисления σ_{mi} разработана нами [5] на основе метода Монте-Карло и интервальных аналитических оценок. Аналитические оценки строятся на свёртке быстро растущей $\sigma_{mi}(E_j)$ и спадающей функции распределения нейтронов $\Phi(E_j)$, вычисляемой для стандартной 299-групповой сетки БНАБ-МИКРО. Предложенная методика позволяет формировать согласованные в рамках прецизионной расчётной модели расширенные библиотеки одногрупповых сечений с требуемой надёжностью.

Методические расчёты по программе MZK для композиций с разным зарядом ядра Z показывают заметную чувствительность вычисляемого состава к высокопороговым реакциям в используемых расширенных библиотеках. Прецизионные расчёты с расширенными библиотеками позволяют уточнить нуклидный состав различных композиций, в том числе и конструкционных материалов, облучаемых в быстром нейтронном спектре при любом времени облучения.

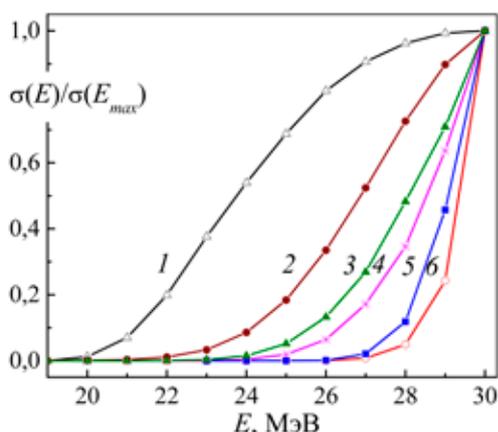


Рис.2.4.9 – Особенности $\sigma_{mi}(E_j)$ для разных реакций: (n, 3n) у ^{69}Ga (1); (n, 2p) у ^{85}Rb (2), (n, n2) у ^{78}Kr (3), (n, n ^3He) у ^{92}Nb (4) и ^{170}Er (6); (n, 2n) у ^{50}Ti (5)

КЛЮЧЕВЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАБОТ

1. Kanaev, A. A. Modeling of the influence of local heat sources on a light gas stratification formation and erosion in a large-scale experimental facility using eddy resolving numerical approach. *Nuclear Engineering and Design*, 421C (2024), 113037.
2. Glotov, V. Yu. Simulation of experiments on thermal radiation effect studying in a large-scale PANDA facility using the CABARET-SC1 code. *Nuclear Engineering and Design*, 419 (2024), 112967/ <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2024.112967>.
3. Асфандияров Д. Г., Сороковикова О. С. Численный метод решения уравнений мелкой воды повышенной точности на основе модифицированной схемы Кабаре. *Математические заметки СВФУ*. Июль-сентябрь, 2023. — Том 30. — № 3.
4. Соловьев А.В., Асфандияров Д.Г. Об одной безусловно устойчивой схеме класса КАБАРЕ для системы уравнений мелкой воды // *Вычислительные методы и программирование*. 2024. — № 25. — С. 64–77. DOI: 10.26089/NumMet.v25r106.
5. E.F. Mitenkova, N.V. Novikov, E.V. Solovjeva. One-group cross-sections of high-threshold reactions for precision neutronics calculations. *Atomic Energy*, V. 133, No. 4, February, 2023, p. 228–232, DOI: 10.1007/s10512-023-01001-7.



ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА



Директор
ИБРАЭ РАН

Л. В. Матвеев

д.ф.-м.н.
(matveev@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 СОПРЯЖЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА, ГИДРОДИНАМИКИ И ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ ДЛЯ ПРОБЛЕМЫ ИЗОЛЯЦИИ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ РАЗЛИЧНЫМИ МЕТОДАМИ
- 3 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И РАСЧЕТНОЕ 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

ОСНОВНЫЕ ИТОГИ 2023 ГОДА

1. Неклассические процессы переноса

На этапе 2022 года была разработана асимптотическая теория переноса примеси посредством адвекции-диффузии в среде с крупномасштабными неоднородностями. В 2023 году построена важная для практических приложений и более простая в сравнении с общим случаем асимптотическая теория переноса примеси посредством диффузии и адвекции на поздних временах, когда адвекция доминирует. Концентрация примеси, испытывающей адвекцию-диффузию в неоднородной среде, представлена в квадратурах — через интегралы вдоль линии тока (линия, в каждой точке которой касательная совпадает с направлением скорости адвекции). Рис. 2.4.10 демонстрирует хорошее согласие результатов расчёта профиля концентрации по асимптотической теории с результатами прямых численных расчётов на основе дифференциального уравнения в частных производных второго порядка, описывающего процесс адвекции-диффузии.

По сравнению с прямыми численными расчётами, в расчётах переноса примеси в неоднородной среде, базирующихся на разработанной здесь асимптотической теории, наряду с их простотой достигается значительная экономия расчётного времени.

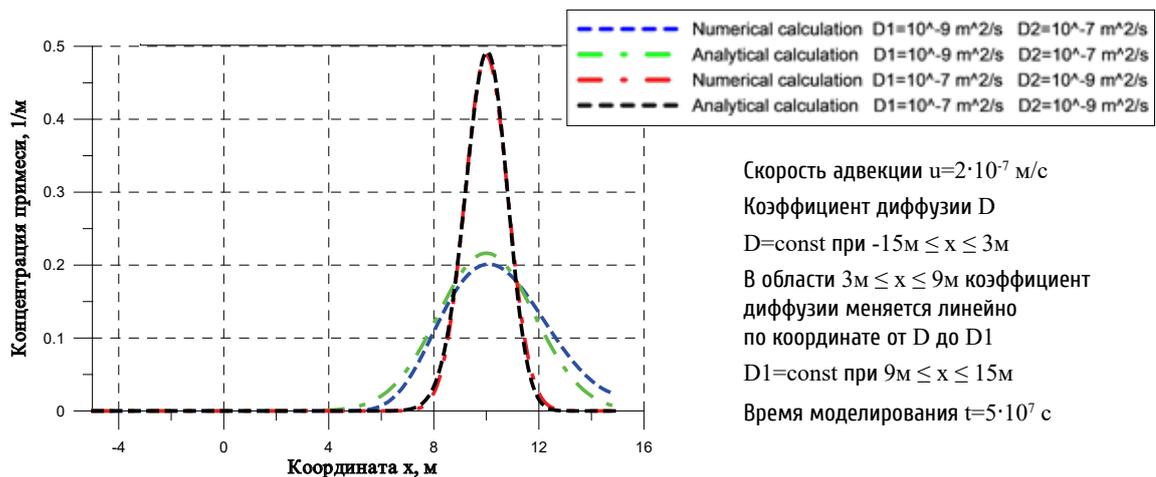


Рис 2.4.10 – Пространственный профиль концентрации примеси на момент времени $t=5 \cdot 10^7$ с при переносе в 1D-геометрии со скоростью адвекции $u = 2 \cdot 10^{-7}$ м/с и коэффициентом диффузии

$$D(x) = D_1 \theta(x_1 - x) + \left[D_1 + (D_2 - D_1) \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} \right] \theta(x - x_1) \theta(x_2 - x) + D_2 (x - x_2),$$

$$x_1 = 3 \text{ м}, \quad x_2 = 9 \text{ м}$$

Numerical calculation – прямой численный расчёт;
 Analytical calculation – расчет на основе асимптотической теории

Проведённое в 2023 году исследование представляет собой дальнейшее развитие асимптотического подхода к описанию процессов переноса в неоднородных средах, инициированного в Лаборатории теоретической физики ИБРАЭ РАН. В 2024 году планируется распространить этот подход на случай модели статистически однородной резко контрастной среды.

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

В ранее развитой нами модели поведения газожидкостных включений и соответствующем программном модуле использовались известные в литературе зависимости скорости миграции включения от градиента температуры внутри него.

В 2023 году с использованием аналитического решения уравнения теплопроводности в области эллиптической формы получена аналитическая зависимость градиента температуры внутри включения от отношения осей эллипсоида, а также от коэффициентов теплопроводности включения и среды и внешнего градиента температуры. При обосновании применимости этой зависимости к включениям прямоугольной формы оси эллипсоида заменялись линейными размерами прямоугольного параллелепипеда и численно решалось уравнение теплопроводности. Далее между собой сравнивались результаты, вычисленные по нашей зависимости, ранее известные результаты и результаты численного решения уравнения теплопроводности в трёхмерной постановке для различных значений соотношения линейных размеров включения.

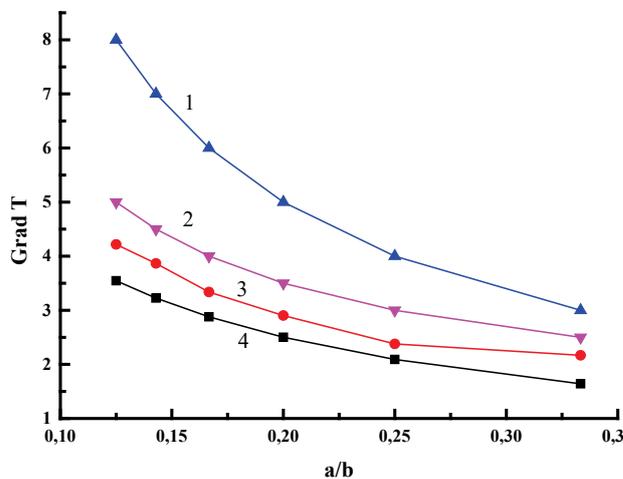


Рис. 2.4.11 – Зависимости градиента температуры внутри включения от отношения линейных размеров.

1, 2 – литературные данные; 3 – данные настоящей работы; 4 – численный расчёт

Сравнение показало лучшее совпадение результатов расчётов по выведенной зависимости с результатами численного решения уравнения теплопроводности (рис. 2.4.11). Это открывает возможность использования полученного аналитического выражения для градиента температуры во включении с целью дальнейшего построения теории термомиграции жидких включений.

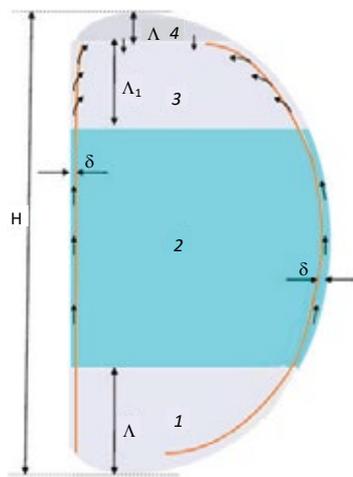
На этапе 2024 года будет построена математическая модель для оценки суммарного прихода рассола в полости различной формы, содержащие тепловыделяющие РАО в залежах галитов. На последующих этапах планируется разработать программный инструмент для систематических параметрических оценок притока рассола в полости различной формы, содержащие тепловыделяющие РАО в залежах галитов, и развить математические модели с целью учёта неравномерного распределения размеров жидких включений.

3. Исследование возможности стратификации водорода в условиях аварии LOCA термоядерного реактора токамак

Итогом работы в 2023 году является физическая модель, предназначенная для выполнения качественных оценок структуры распределения водорода, в том числе и возможности его стратификации, в вакуумной камере токамака в аварийных ситуациях, связанных с поступлением воды из системы охлаждения первой стенки или дивертора (авария типа LOCA) и последующим окислением поверхностей бериллиевых тайлов. Основными элементами модели являются пограничный слой на боковой границе ВК, диффузия вблизи потолка ВК, турбулентное течение в основном объёме ВК — турбулентный ветер, а также диффузия и конвекция вблизи дна ВК.

С использованием разработанной модели установлено, что вблизи потолка и дна ВК за счёт встречной диффузии водорода и водяного пара образуются относительно тонкие $\Delta \sim 1$ см горизонтальные слои газовой смеси с концентрацией водорода $c > 0,1$ (рис. 2.4.12). Ниже такого слоя у потолка благодаря действию восходящего свободно-конвективного пограничного слоя (СКПС) на боковой поверхности границы ВК образуется область с меньшими, но также повышенными концентрациями водорода.

На рис. 2.4.13 показаны результаты сравнения зависимостей концентрации водорода на границе СКПС от времени для бериллиевой поверхности ПС (твёрдый слой), полученных по корреляциям INL (Moore Richard L. Final Report on ITER Task Agreement 81-08. Idaho National Laboratory, Idaho Falls, Idaho 83415, March 2008, INL/EXT-08-13894) и корреляциям для окисления отечественного бериллия, полученным на основании результатов работы (Ovchinnikov I., Komarov A., Kuznetsov V., Titov V. Real-time measurement of hydrogen generation level during beryllium dust oxidation by steam depending on the dust arrangement geometry. — Fusion Engineering and Design, 2006, vol. 81, p. 2073—2084). Из сравнения графиков видно, что лишь для относительно низкой температуры ($T = 773\text{—}873$ К) наблюдается качественное согласие результатов, полученных по двум корреляциям. При высокой



- 1 – слой с конвекцией Рэлей–Бенара, включая придонный слой, обогащённый водородом;
- 2 – область водяного пара;
- 3 – стратифицированный слой, обогащённый водородом;
- 4 – прижатый к потолку слой с максимальным содержанием водорода

Рис. 2.4.12 – Схематическое изображение зон с различной концентрацией H_2 в ВК, формируемых в ходе аварии LOCA. Вдоль боковых границ ВК формируются пограничные слои. Стрелками показаны направления миграции водорода

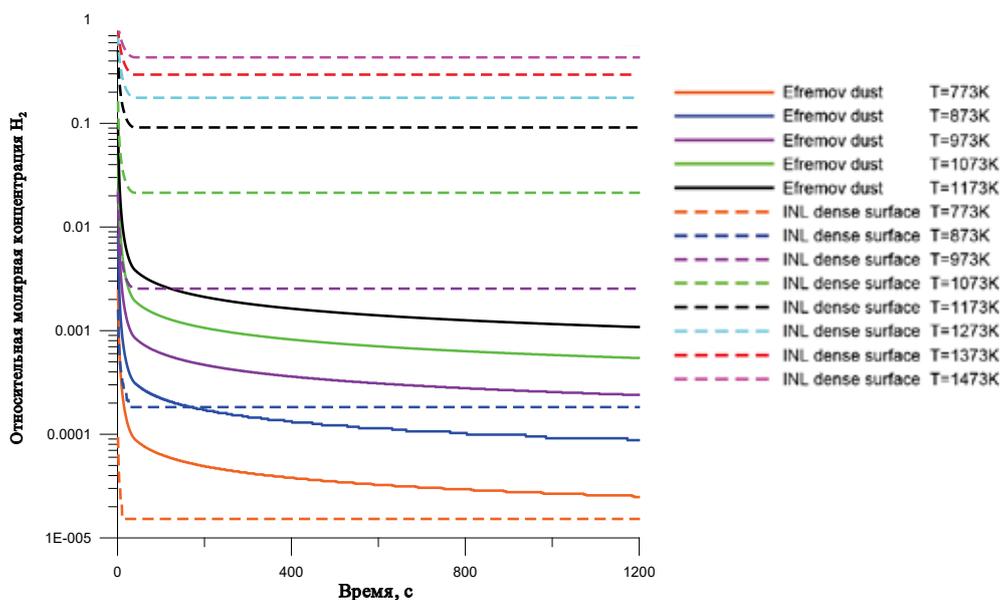


Рис. 2.4.13 – Расчётная динамика относительной молярной концентрации водорода в смеси пар-водород на боковой границе твёрдой стенки ВК при различных температурах

температуре корреляция INL даёт значительно более высокие результаты, что означает значительно более мощную кинетику окисления в корреляции INL для плотного Be в сравнении с экспериментальными результатами НИИЭФА им. Д.В. Ефремова.

4. Усовершенствованная модель окисления ATF-оболочки из сплава FeCrAl

Разработана новая усовершенствованная аналитическая модель высокотемпературного окисления перспективной ATF-оболочки на основе сплава FeCrAl.

В экспериментах (например, P. Doyle, Ju. Stuckert, M. Grosse, V. Steinbrueck, A. Nelson, J. Harp, K. Terrani, "Analysis of iron-chromium-aluminum samples exposed to accident conditions followed by quench in the QUENCH-19 experiment", J. of Nuclear Materials, 580, 2023, 154433, 15 pp.) было замечено, что окисление оболочки значительно усиливается, когда температура достигает значений около 1250~1400°C, что близко к температуре плавления FeO ($T=1377^{\circ}\text{C}$).

В рамках модели предполагаем, что из-за относительно низкой температуры плавления защитного оксидного слоя (основная часть которого состоит из FeO) мы сталкиваемся с увеличенной скоростью диффузии кислорода в этом диапазоне температур по сравнению с твёрдым оксидным защитным слоем.

Рассмотрим моделирование интегрального эксперимента QUENCH-19, проведённого в KIT, Карлсруэ, Германия. Используем специальный быстродействующий код SFPSA, разработанный для моделирования решения уравнений диффузии кислорода при высокотемпературном окислении. Результаты моделирования со стандартной корреляцией окисления FeCrAl и эффективным повышенным коэффициентом диффузии кислорода в оксидном слое $Deff=K_{diff} \cdot D$, где D — стандартный коэффициент диффузии кислорода в твёрдом слое FeCrAl, показаны на рис. 2.4.14.

Можно видеть, что применение стандартной параболической постоянной (стандартное значение коэффициента диффузии кислорода D в оксидном слое) приводит к значительному занижению интегрального образования водорода в расчёте. Использование в коде повышенного коэффициента диффузии приводит к адекватному моделированию образования H_2 в согласии с экспериментом QUENCH-19. В расчёте предполагалось, что параметр K_{diff} линейно увеличивался во времени от $K_{diff}=1$ до $K_{diff}=6$, начиная с момента, когда температура на высоте 950 мм (максимальная температура в сборке) достигла $T=1250^{\circ}\text{C}$. Этот период продолжался до начала повторного залива. Продолжительность этого периода составила около 100 с.

Несмотря на эти результаты, применение оболочки на основе сплава FeCrAl в активной зоне реакторов выглядит разумным вследствие появления запаса времени и возможности исключения перехода в тяжелоаварийную стадию. Наибольший выигрыш от использования

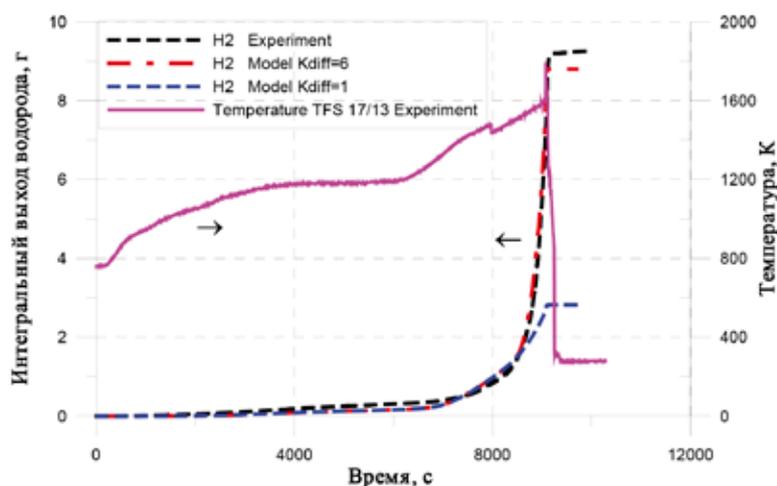


Рис. 2.4.14 — Интегральная генерация водорода в эксперименте QUENCH-19 с оболочками из FeCrAl: расчёт и экспериментальные данные

оболочек из FeCrAl ожидается для сценариев с диапазоном температур около 700—1200°C в рамках проектных аварий, при этом ожидается низкая скорость генерации водорода.

Исследования по теме безопасности термоядерных реакторов ведутся в ИБРАЭ с 2021 года. Принципиально новым организационным моментом в 2023 году стала высокая степень взаимодействия с другими участниками исследований, обусловленная наличием для изучаемых объектов очень широкого спектра различных взаимосвязанных физико-химических процессов. Соответственно, участники проекта разрабатывают аналитические и численные модели отдельных процессов, которые затем объединяются в рамках единого кода.

Исследования по поиску новых перспективных материалов для оболочек тепловыделяющих элементов ведутся очень интенсивно во всем мире после аварии на АЭС «Фукусима-1». К настоящему времени определились наиболее перспективные материалы для ATF-оболочек для использования в реакторах нового поколения, проводится целый комплекс экспериментальных исследований. Тем не менее, специалисты до сих пор предлагают новые и новые варианты ATF-оболочек. Принципиально новым моментом является вовлечение в данные исследования специалистов из большого числа стран и проведение экспериментов с очень высокой инструментальной точностью, что должно способствовать решению задач обеспечения высокой степени безопасности атомной энергетики.

В 2024 году планируется провести аналитические и численные исследования по окислению бериллиевых, вольфрамовых и графитовых поверхностей в ходе аварии на термоядерном реакторе токамак, внедрить в код модели поведения (повторное взвешивание, окисление, взрыв) металлической пыли. Планируется создать усовершенствованный единый численный код для расчёта поведения перспективных ATF-оболочек, включая Zr/Cr-оболочки, оболочки на основе Cr/Ni и FeCrAl, керамические оболочки SiC/SiC.

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

Спин (собственный угловой момент) — фундаментальный параметр физических полей и частиц, связанный с группой Лоренца, характеризующий микроструктурные свойства материи и проявляющийся в эффектах вращения, поляризации и спиральности. Изучение квантово-механической и классической динамики частицы и спина необходимо для понимания поведения сложных физических систем, а также решения практических задач в приложении к высокоточным экспериментам в физике высоких энергий, релятивистской астрометрии и космической навигации, при создании новых физических приборов и разработке новых методов и моделей для решения проблем безопасного использования атомной и термоядерной энергии. В 2023 году:

- дан систематический анализ спиновых эффектов в прецизионных экспериментах на ускорителях частиц и в накопительных кольцах по проверке фундаментальных физических симметрий. Одной из наиболее актуальных проблем современной физики является поиск P- и CP(T)-неинвариантных электрических дипольных моментов (ЭДМ) атомов, частиц и ядер с чувствительностью вплоть до 10^{-15} по отношению к магнитным моментам, разрешенным всеми дискретными симметриями. Вычисление существенных вкладов гравитации и вращения Земли в динамику спина показало, что в сверхчувствительных поисках ЭДМ как заряженных частиц, так и нейтронов, при предельно достижимой чувствительности к ЭДМ протона эти имитирующие ЭДМ спиновые эффекты могут на один-два порядка превышать сигнал ЭДМ протона, и тем самым стать сопоставимыми с вкладом ЭДМ в экспериментах с ультрахолодными нейтронами. Качественно новым результатом является демонстрация того, что прецессирующий спин может быть использован в качестве детектора аксионоподобной темной материи.
- продолжено исследование спиновых и поляризационных эффектов в рамках калибровочного подхода в теории гравитации с целью их использования для экспериментальной проверки геометрической структуры пространства-времени и установления возможных

нарушений фундаментальных физических симметрий и отклонений геометрии от римановой структуры. Показано, что взаимодействие электромагнитного поля с пост-римановыми геометрическими полями приводит к качественно новым эффектам типа Фарадея, и измерение угла вращения вектора поляризации электромагнитной волны позволяет оценить величину аксиального кручения. Анализ астрофизических данных распределения поляризации излучения далеких радиоисточников приводит к улучшению оценки верхней границы величины фонового кручения. Развивая исследования моделей сплошных сред с микроструктурой, построена новая вариационная теория жидкости с гипермоментом.

- проанализированы возможные наблюдаемые проявления взаимодействия «спин-вращение», опираясь на полученные ранее результаты, расширяющие концепцию магнитной спиральности в электромагнетизме до гравитомагнитной спиральности в рамках теории гравитоэлектромагнетизма. Для физически важного случая Вселенной гёделевского типа с вращением продемонстрирована связь между взаимодействием спина и гравитомагнитного поля и силой «спин-кривизна» Матиссона. Показано, что гравитомагнитная сила Штерна-Герлаха вследствие связи спина с гравитомагнитным полем сводится в соответствующем пределе соответствия к классической силе «спин-кривизна» Матиссона.

6. Новый подход к теории элементарных частиц, принимающий во внимание гравитационное взаимодействие

Новая концепция квантовой теории объединяет электрон с чёрными дырами. Продолжая рассмотрение черной дыры Керра-Ньюмана (КН) как классической модели электрона, мы рассматриваем гравитацию Эйнштейна как классическую теорию пространства-времени (которая подтверждена экспериментально, и согласно новой концепции Р. Пенроуза, не должна квантоваться), в процессе объединения с квантовой теорией, поскольку она не менее фундаментальна, чем квантовая теория.

Согласуясь с концепцией Р. Пенроуза, чёрно-белая дыра КН классически излучает энергию наряду с ее поглощением, формируя белый лист как лист электрона и чёрный лист как лист позитрона в виде двух классических полу-струн, которые объединяются в квантовое вакуумное состояние алгеброй суперсимметрии. Отдельное рассмотрение голого и одетого электрона связывается с выделением чисто классической гравитации, которая образует безмассовую кольцевую струну как вектор состояния в представлении Гейзенберга, сжимающуюся в квантовую точку преобразованиями Лоренца, что реализует волновую функцию уравнения Шредингера как объединяющую волну и частицу модель волны-пилота Бома-де Бройдя.

Проблема построения чёрно-белых аналогов чёрных дыр известна давно, но для электрона КН такое решение не удавалось остроить. Анализируя эту проблему в основной работе Дебнея, Керра и Шильда (ДКШ, 1969), мы обнаруживаем, что решение КН не является полным и содержит только безрадиационную часть, поскольку система уравнений была проинтегрирована в ДКШ только при специальном дополнительном условии, которое сохраняет сильную магнитную связь между входящим и уходящим электромагнитными полями, но не описывает связывающее их электромагнитное излучение, формирующее единую струнную систему.

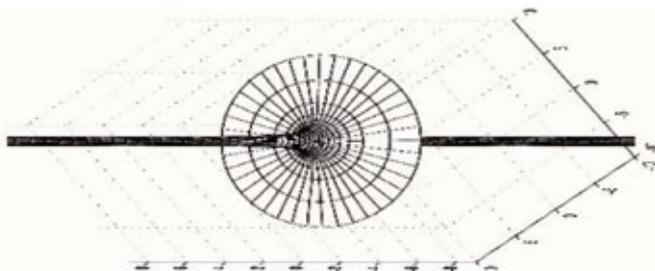


Рис. 2.4.15 — Формирование излучающего решения КН с осевой сингулярностью

Были рассмотрены необходимые условия согласованности входящего и выходящего излучения, и обнаружено, что при согласовании возникает дополнительная осевая сингулярность, расположенная ортогонально к белой и черной кольцевым струнам, как показано на рис. 2.4.15, и сочетание постоянного поля петель Вильсона с периодическим возбуждением, зависящим от запаздывающего времени, позволяет сделать решение КН излучающим.

В ближайшей перспективе планируется проанализировать связь новой концептуальной модели с недавними предложениями Ван Ху (Wang H-Y) по решению проблемы чёрной материи в квантовой теории, а также, возможно, проблемы связи мирового и собственного времени.

7. Исследования. Результаты работы

1) Ядерный источник света в диапазоне вакуумного ультрафиолета на основе ядра ^{229}Th .

Возбужденные на низколежащее изомерное состояние с энергией 8.3 эВ ядра ^{229}Th , имплантированные в диэлектрик с большой (превышающей 8.5—9.0 эВ) шириной запрещенной зоны будут распадаться с излучением гамма-кванта УФ диапазона (длина волны 150 нм). Внутренняя электронная конверсия — основной канал распада низкоэнергетических ядерных уровней — в такой диэлектрической матрице запрещена законом сохранения энергии. Это открывает принципиальную возможность создания ядерного источника света в диапазоне вакуумного ультрафиолета на основе ядра ^{229}Th . Такой ядерный источник света может помочь решить две основные проблемы — возбуждение низколежащего изомера $^{229\text{m}}\text{Th}$ (3/2+, 8.228 эВ) и прецизионное измерение энергии ядерного изомерного перехода.

Ядерный источник света тория основан на ядрах, имплантированных в тонкую диэлектрическую плёнку с большой шириной запрещённой зоны (рис. 2.4.16). При прохождении через образец электрического тока ядра ^{229}Th в процессе неупругого рассеяния электронов проводимости возбуждаются на низкоэнергетическое изомерное состояние. Последующий спонтанный распад Th сопровождается испусканием γ -квантов в ВУФ-диапазоне. Светимость такого ториевого ядерного источника света составляет примерно 10^5 фотонов/с на 1 А тока и на 1 нг ^{229}Th (рис. 2.4.17).

Предложенную схему получения γ -излучения изомера $^{229\text{m}}\text{Th}$ можно рассматривать как своего рода ядерный аналог оптического излучения, возникающего в обычных МДП (металл-диэлектрик-полупроводник) структурах при прохождении электрического тока.

Данная работа является продолжением исследований свойств аномально низколежащего изомерного состояния в ядре ^{229}Th , проводившихся в течение последних лет. Помимо сугубо научных целей, всестороннее изучения ядра ^{229}Th имеет и прикладное значение. В нескольких крупных научных центрах Европы, США, Китая ускоренными темпами ведется разработка сверхточных ядерных часов на базе ^{229}Th . Кроме того, на низкоэнергетическом изомерном переходе в ^{229}Th можно создать первый в мире гамма-лазер УФ-диапазона. Поэтому проводимые нами в данном направлении исследования крайне

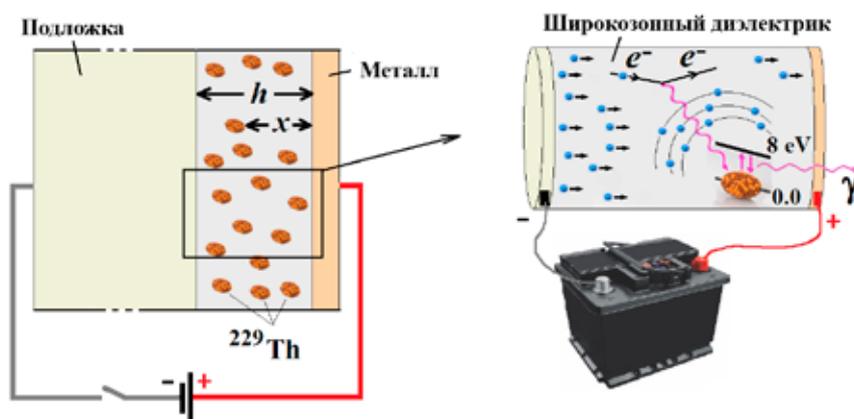


Рис. 2.4.16 — Схема ядерного источника света на ^{229}Th .

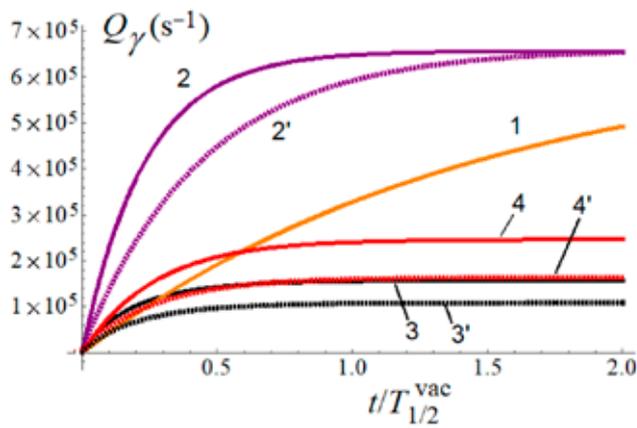


Рис. 2.4.17 – Гамма-активность образца на 1 А проходящего через него электрического тока и на 1 нг ^{229}Th как функция времени поддержания тока через образец. 1 – мишень из ионов ^{229}Th в вакууме; 2 (2') – та же мишень в бесконечной среде $\text{SiO}(\text{MgF})$; 3 (3') – ториевая мишень в образцах $\text{Si}/\text{Th}:\text{SiO}/\text{Pd}(\text{Au}/\text{Th}:\text{MgF}/\text{Au})$ с равномерным распределением ядер ^{229}Th по глубине; 4 (4') – все ядра ^{229}Th находятся в тонком слое $\text{SiO}(\text{MgF})$, расположенном на глубине 6 нм в допированном Si (см. рис. 2.4.16).

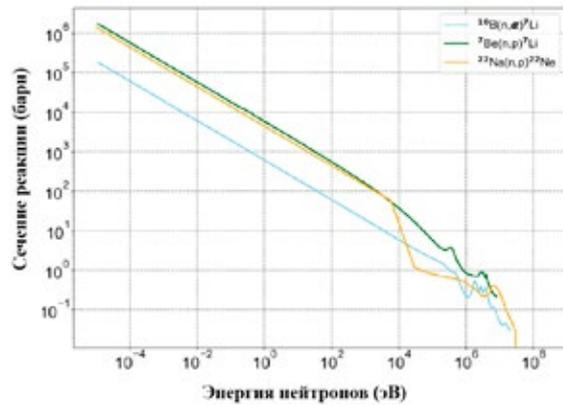


Рис. 2.4.18 – Сечения поглощения нейтронов в реакциях нейтрон-захватной терапии

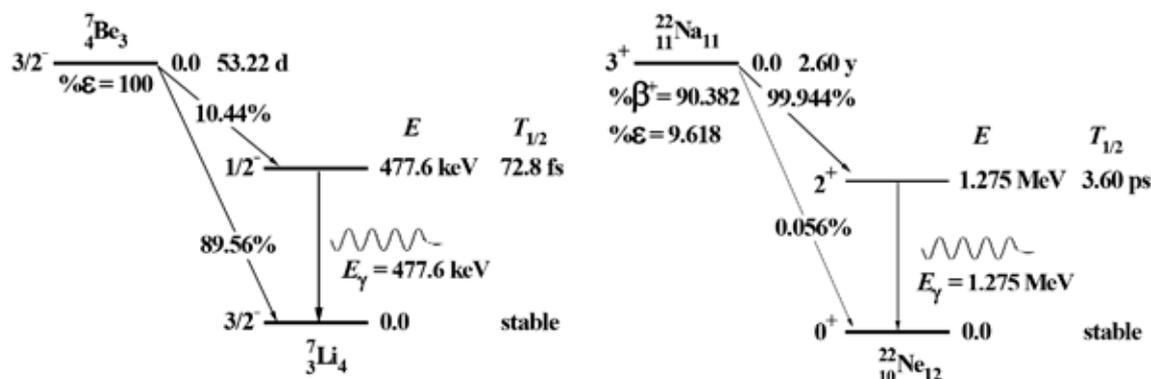
важны для нашей страны. В следующем году мы планируем сосредоточиться на изучении новых эффективных механизмов возбуждения изомерного состояния $3/2+(8.3 \text{ эВ})$ в ^{229}Th , что является одной из основных до сих пор нерешённых проблем на пути создания гамма-лазера и ядерных часов.

2) Новые радионуклиды ^7Be и ^{22}Na для нейтрон-захватной лучевой терапии рака.

На протяжении десятилетий в так называемой нейтрон-захватной лучевой терапии опухолей, когда активный изотоп (атомное ядро) подвергается индуцированному радиоактивному распаду после захвата нейтрона, используются исключительно изотопы бора ^{10}B в реакции $^{10}\text{B}(n,\alpha\gamma)^7\text{Li}$. Этот метод сочетает в себе свойства локального энерговыделения (осколки распадающегося ядра тормозятся и выделяют энергию в ближайшей окрестности с радиусом порядка миллиметра) и хороший временной контроль лучевой терапии, поскольку поток нейтронов можно быстро включать и выключать. Несмотря на более чем 60 лет исследований и разработок, бор-нейтронзахватная терапия всё ещё находится на экспериментальной стадии. Во-первых, зачастую сложно идентифицировать борсодержащие соединения, которые можно избирательно накапливать и удерживать в необходимой концентрации в конкретных опухолевых клетках. Во-вторых, помимо множества успешных практических применений, наблюдалось значительное количество побочных эффектов нейтронного облучения здоровых тканей. В-третьих, необходимые потоки нейтронов ($10^9\text{—}10^{10} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$) до недавнего времени были доступны только в ядерных реакторах и в крупномасштабных ускорительных комплексах, что предполагало сложную, дорогую и качественную инфраструктуру.

Чтобы снять часть проблем, нами предложены два других нуклида, также пригодных для лучевой терапии, а именно, ^7Be и ^{22}Na . Указанные ядра имеют примерно в десять раз большее сечение поглощения нейтронов (рис. 2.4.18), что обеспечивает ряд преимуществ при использовании их в нейтрон-захватной терапии. Это, в частности, более низкая концентрация нуклидов в тканях-мишенях или более низкий поток нейтронов при облучении. Кроме того, оба ядра при спонтанном распаде дают характерное γ -излучение (рис. 2.4.19), что позволяет отобразить распределение ^7Be и ^{22}Na в биологических тканях.

Данные преимущества могут открыть новые возможности для создания фармпрепаратов на основе ^7Be и ^{22}Na и применения нейтрон-захватной терапии в качестве более безопасного и эффективного метода лечения отдельных видов злокачественных новообразований.

Рис. 2.4.19 – Схемы распадов ядер ${}^7\text{Be}$ и ${}^{22}\text{Na}$

Настоящая работа завершает проводившиеся в течение нескольких лет теоретические исследования по поиску новых нуклидов для нейтрон-захватной терапии.

КЛЮЧЕВЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАБОТ

1. Корчагина О. О. Распределение температуры внутри жидкого включения в поле внешнего градиента температуры. Известия РАН. Энергетика. (в печати).
2. Artur R. Avetisyan, Olesya O. Korchagina, Leonid V. Matweev, Mathematical Modelling of Thermomigration and Evolution of a Liquid Droplet in Salt Under Homogeneous Temperature Gradient Field, Proceedings of CHT-24 ICHMT International Symposium on Advances in Computational Heat Transfer, May 26–30, 2024, Istanbul, Turkiye.
3. Vasiliev A.D., Dolganov K.S., Kisselev A.E., Matweev L.V., Semenov V.N. Engineering Model of Beryllium Dust Layer Oxidation in an Accident with Coolant Outflow from the Cooling System into the ITER Vacuum Chamber. ISSN 1063-7788, Physics of Atomic Nuclei, 2023, Vol. 86, No. 7, pp. 1545–1554. © Pleiades Publishing, Ltd., 2023. (in English).
4. Васильев А.Д., Долганов К.С., Киселёв А.Е., Кондратенко П.С., Матвеев Л.В., Семёнов В.Н. Возможность стратификации водорода в условиях аварии с истечением теплоносителя из системы охлаждения в вакуумную камеру токамака. Вопросы атомной науки и техники (ВАНТ). Серия Термоядерный синтез, 2023, – Т. 46, – Вып. 2, – С. 72–86.
5. Vasiliev A.D., Dolganov K.S., Kisselev A.E., Kondratenko P.S., Matweev L.V., Semenov V.N. Possibility of hydrogen stratification under accident conditions with coolant loss from the cooling system into vacuum vessel at tokamaks. ISSN 1063-7788, Physics of Atomic Nuclei, 2023, Vol. 86, Suppl. 2, pp. S241–S252. © Pleiades Publishing, Ltd., 2023. (in English).
6. Vasiliev A.D. Analytical Advanced Analytical and Numerical Modelling of ATF FeCrAl and Cr-Coated Zr-Based Cladding High Temperature Oxidation in Steam Atmosphere // Proc. International Conference "Nuclear Energy for New Europe 2023" (NENE-2023), Bled, Slovenia, September 11–14, 2023. NENE-2023-712.
7. Вергелес С.Н., Николаев Н.Н., Обухов Ю.Н., Силенко А.Я., Теряев О.В., Эффекты общей теории относительности в прецизионных спиновых экспериментах по проверке фундаментальных симметрий // УФН, 2023. – Т. 193. – С. 113–154.
8. Obukhov Yu. N., Hehl F. W. Hyperfluid model revisited // Phys. Rev. D. – 2023. – V. 108. – P. 104044.
9. Obukhov Yu.N., Spin as a probe of axion physics in general relativity // Int. J. Mod. Phys. A, 2023. – V. 38. – P. 2342002.
10. Trukhanova M.I., Andreev P., Obukhov Yu.N., Search for manifestations of spin-torsion coupling // Universe, 2023. – V. 9(1). – P. 38.
11. Mashhoon B., Molaei M., Obukhov Yu.N., Spin-gravity coupling in a rotating universe // Symmetry, 2023. – V. 15(8). – P. 1518.
12. Burinskii A. A bare and gravitationally dressed electron formed from Kerr-Newman black hole // Phys. Part. Nucl., 2023. – V. 54. – P. 1033.
13. V.I. Kukulin, A.V. Bibikov, E.V. Tkalya, M. Ceccarelli, I.V. Bodrenko. ${}^7\text{Be}$ and ${}^{22}\text{Na}$ radionuclides for a new therapy for cancer. Biomolecular Concepts 14, 20220028 (2023). DOI: <https://doi.org/10.1515/bmc-2022-0028>.
14. E. V. Tkalya, P. V. Borisyuk, M. S. Domashenko, Yu. Yu. Lebedinskii. Proposal for a Nuclear Light Source. Chinese Physics C 47, No. 2, 024103 (2023). DOI: <http://cpc.ihep.ac.cn/article/doi/10.1088/1674-1137/ac9f0a>.

3 Развитие инфраструктуры

В ИБРАЭ РАН постоянно 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 2023 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 увеличена и 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 (polysom), 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;
- увеличена пропускная способность каналов связи ЛВС, М9, Интернет.

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;
- 25 место в ТОП-50 суперкомпьютеров России (<http://top50.supercomputers.ru/list>).

Своевременное обслуживание системы коммуникаций Института обеспечило в 2023 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 «Backpack», оснащенный сканером-идентификатором радионуклидов, GPS-приемником и компактным ПК, с функцией автоматического гамма-сканирования территории;
- высокочувствительные дозиметры-радиометры МКС-17Д «Зяблик», портативные дозиметры гамма- и рентгеновского излучения ДКГ-09Д «Чиж», оснащенные сцинтилляционным детектором;
- портативные индивидуальные дозиметры ДКГ-РМ1610 «Полимастер».

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

При проведении работ на объектах ядерного наследия и на площадках предприятий атомной отрасли в 2023 году активно использовались высокопроизводительные лазерные сканеры, предназначенные для оперативного создания цифровых моделей объектов и трёхмерных моделей местности.

**КЛАСТЕР ИБРАЭ РАН
НАХОДИТСЯ НА**

25 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)

В 2023 году ИБРАЭ РАН участвовал в семи международных исследовательских проектах МАГАТЭ, один из которых был завершён в отчётном периоде:

1. «Расчёт нейтронных характеристик пусковых тестов CEFR с использованием транспортных (CORNER) и диффузионных компьютерных кодов нового поколения» (отв. В.П. Березнев) в рамках согласованного проекта исследований МАГАТЭ I31032 «Бенчмарк нейтронных характеристик пусковых тестов CEFR».

Основная работа над проектом была завершена в 2022 году, в отчётном периоде велась работа по подготовке двух технических документов по проекту (TECDOS-1, 2), которые должны быть завершены в 2024 году.

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 завершён. Итоговый отчёт по проекту был подготовлен в середине 2023 года.
3. «Определение и оценка источников неопределённостей и их влияния на расчёты ключевых параметров по тяжёлоаварийному коду СОКПАТ/ВЗ» (отв. В.Н. Семенов, 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».

В отчетном году специалисты ИБРАЭ РАН принимали участие в подготовке двух технических документов по результатам, полученным в ходе выполнения проекта:

- «Развитие современных методов анализа неопределённостей и чувствительности для анализа тяжёлых аварий в водоохлаждаемых реакторах типа ВВЭР» (Advancing the State-of-Practice in Uncertainty and Sensitivity Methodologies for Severe Accident Analysis in Water Cooled Reactors of VVER Types);

- «Развитие современных методов анализа неопределённостей и чувствительности для анализа тяжёлых аварий в водоохлаждаемых реакторах на основе эксперимента QUENCH-6» ("Advancing the State-of-Practice in Uncertainty and Sensitivity Methodologies for Severe Accident Analysis in Water Cooled Reactors of the QUENCH-6 Experiment"). Проект должен завершиться в июне 2024 года.
4. «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 года, окончание — октябрь 2024 года. 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 2023 году проведены расчёты по термодинамике расплава в экспериментах MASCA, моделируемых в бенчмарке MASCA-CORDEB-2 и чистовые расчёты восьми задач бенчмарка PWR-Generis, оценочные расчёты (код HEFEST_M пакета HEFEST_URAN) термомеханики корпуса реактора при удержании расплава — бенчмарк VVER-Mechanical и ряд иных работ.
 5. «Численное исследование характеристик аварийно-устойчивого топлива в условиях запроектных аварий с помощью интегрального кода СОКПАТ» (отв. К.С. Долганов) в рамках согласованного проекта исследований МАГАТЭ T12032 «Тестирование и моделирование передовых технологий и аварийно-устойчивых видов топлива (ATF-TS)». Проект был начат в марте 2021 года, окончание планируется на август 2024 года. В 2023 году специалисты ИБРАЭ РАН выполнили комплекс расчётов по экспериментам QUENCH-19, DEGREE-B3, CODEX-ATF и ряду иных.
 6. «Бенчмарк процесса перехода от принудительной к естественной циркуляции в эксперименте с жидкометаллическим контуром» (отв. Н.А. Мосунова, О.Х. Ильасова) в рамках одноименного согласованного проекта исследований МАГАТЭ I31038. Проект был начат в мае 2022 года и продлится до августа 2026 года. В проекте используется разрабатываемый в ИБРАЭ РАН код HYDRA-IBRAE/LM, который, в отличие от некоторых одномерных кодов, используемых в проекте другими участниками, позволяет моделировать процессы на всех трёх этапах экспериментов, включая переходный. Специалистами ИБРАЭ РАН была подготовлена расчётная модель, проведена дискретизация расчётной области и выполнены расчёты двух экспериментальных пусков, проведённых на установке NACIE-UP (Италия), в которых в качестве теплоносителя использовалась свинцово-висмутовая эвтектика.

Участие в Комитетах и рабочих группах МАГАТЭ

Специалисты ИБРАЭ РАН А.А. Киселев и И.Л. Абалкина в 2023 году 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, EPRReSC) и в Комитете МАГАТЭ по стандартам в области безопасного обращения с ПАО (Waste Safety Standards Committee, WASSC) соответственно.

В рамках EPRReSC проводится анализ разработанных, разрабатываемых и пересматриваемых документов МАГАТЭ, в том числе оценка ревизий документов GS-G-2.1 и GSG-2, и утверждён план работы над редакцией основополагающего документа в области реагирования на ядерные и радиационные аварии GSR Part 7.

Специалисты ИБРАЭ РАН (В.И Шпиньков, С.А. Богатов) участвуют в работе рабочей группы по подготовке документов МАГАТЭ, посвящённых регулированию и оценке безопасности и особенностям проектирования термоядерных установок. В составе экспертных групп они приняли участие в подготовке трёх технических документов (TECDOC) МАГАТЭ:

- Вопросы вывода из эксплуатации термоядерных установок;
- Опыт учёта безопасности при проектировании и обосновании безопасности термоядерных установок;
- Международный опыт регулирования термоядерных установок.

В 2023 году специалисты ИБРАЭ РАН приняли участие в:

- техническом совещании по вопросам вывода из эксплуатации термоядерных установок (6—10 февраля 2023 года);
- техническом совещании проекта ИНПРО «Законодательные и организационные вопросы перспективного размещения термоядерных установок» (3—6 апреля 2023 года);
- консультативном совещании по вопросам вывода из эксплуатации термоядерных установок (2—6 октября 2023 года);
- 29-й конференции МАГАТЭ по термоядерному синтезу (16—21 октября 2023 г.);
- техническом совещании МАГАТЭ по разработке основных принципов безопасности и регулирования при проектировании установок термоядерного синтеза (23—25 октября 2023 года);

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

Сеть ENVIRONET была создана под эгидой МАГАТЭ в 2009 году. В её рамках реализуются отдельные проекты, организуются технические совещания, проводятся учебные курсы и вебинары, готовятся публикации по различным аспектам деятельности в данной области. С 2020 года И.Л. Абалкина является специальным советником (Special Adviser) Управляющего комитета ENVIRONET.

В 2023 году деятельность ИБРАЭ РАН в рамках ENVIRONET включала участие наших специалистов (И.Л. Абалкина) в заседаниях Управляющего комитета ENVIRONET, в Техническом совещании по вопросам принятия решений в области восстановления окружающей среды и в ряде вебинаров, проводившихся под эгидой Сети ENVIRONET (в режиме онлайн).

Участие в совместных учениях и тренировках

В 2023 году специалисты ИБРАЭ РАН приняли участие в двух учениях. Учение ConvEx-2a — 14 июня 2023 года, организовано МАГАТЭ. Согласно сценарию, вблизи одной из АЭС произошло сильное землетрясение (7,8 балла по шкале Рихтера), что привело к разлёту обломков турбины и серьёзным повреждениям здания машзала. По сценарию, отказ турбины инициировал автоматический сигнал на останов реактора, но аварийная защита не сработала. Повреждение турбины вызвало множественные гидроудары во втором контуре. Ответ ЦНТП ИБРАЭ РАН на вводные был оперативно подготовлен и направлен в ЧУ «СКЦ Росатома».

Учение ConvEx-2b — 6 сентября 2023 года, организовано МАГАТЭ. Согласно вводной и замыслу учений, во время транспортировки был похищен промышленный радиографический источник ^{192}Ir (иридий-192) с номинальной активностью 5 ТБк.

ЦНТП ИБРАЭ РАН на запрос о помощи при реагировании на радиологическую аварийную ситуацию в ходе учений произвёл сбор и обработку материалов, на основании которых был сформирован ответ для ЧУ «СКЦ Росатома» по изложенной выше теме.

Участие в конференциях и совещаниях под эгидой МАГАТЭ

В 2023 году специалисты ИБРАЭ РАН участвовали более чем в 40 различных мероприятиях МАГАТЭ (технические и консультативные совещания, международные конференции, совещания Руководящего комитета сети МАГАТЭ «ENVIRONET», семинары-практикумы и вебинары по различным тематикам).

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

В настоящее время, в связи с решением Совета ОЭСР о приостановлении членства Российской Федерации в АЯЭ, сотрудничество продолжается только в проекте «THEMIS» («Эксперименты ТНАИ 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.

В 2023 году ответственный исполнитель по проекту (Becker Technologies GmbH) подготовил файлы с данными и отчёт по результатам интересующих ИБРАЭ РАН экспериментов HD 47-51 по исследованию крупномасштабного горения водорода (8% или 10%) в условиях малого содержания кислорода (7%) при содержании пара 25% и давлении 1.5 бар. Результаты экспериментов HD 47—51 будут использованы специалистами ИБРАЭ РАН для верификации моделей горения водородсодержащих газовых смесей в условиях, характерных для поздней фазы тяжёлой аварии (низкие концентрации кислорода и наличие угарного газа).

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

В период с 19 по 23 мая 2023 года прошла 70-я сессия НКДАР ООН. В основной состав российской делегации была включена заведующая лабораторией проблем коммуникации при оценке риска Е.М. Мелихова. Ею был проведен детальный анализ двух документов, подготовленных к обсуждению на сессии (R.758 — Эпидемиологические исследования радиации и рака и R.759 — Оценка облучения населения ионизирующим излучением), а также Доклада НКДАР ООН для представления на Генеральной ассамблее ООН. Замечания и комментарии ИБРАЭ по этим документам были включены в официальные предложения российской делегации.

ДВУСТОРОННЕЕ СОТРУДНИЧЕСТВО С НАЦИОНАЛЬНЫМИ ОРГАНИЗАЦИЯМИ ЗАРУБЕЖНЫХ СТРАН

Сотрудничество с Китайской Народной Республикой

Сотрудничество с Пекинским научно-исследовательским институтом геологии урана (БРИУГ) началось в 2020 году с подписания Соглашения о сотрудничестве между ИБРАЭ РАН, ФГУП «НО РАО» и БРИУГ в области долговременного хранения и захоронения радиоактивных отходов.

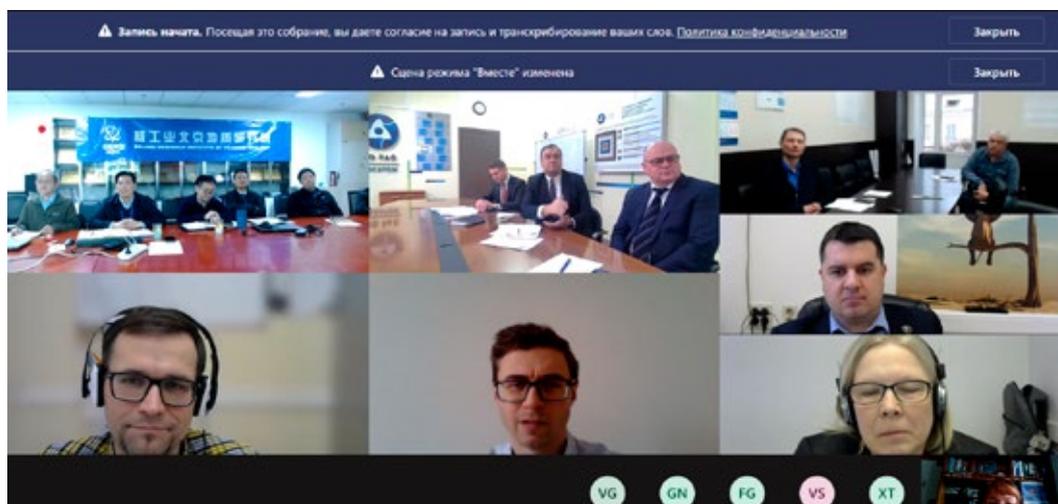


Рис. 4.1 – Обсуждение вопросов трехстороннего сотрудничества между ИБРАЭ РАН, НО РАО и БРИУГ на онлайн-совещании 28 февраля 2023 г.

28 февраля 2023 года было проведено 3-е онлайн-совещание, на котором обсуждались текущие работы в национальных подземных исследовательских лабораториях (ПИЛ), вопросы моделирования трещин и возможный визит на площадку ПИЛ в Бэйшане в сентябре 2023 года. На встрече было представлено семь докладов (три — ИБРАЭ РАН и четыре — БРИУГ).

В сентябре 2023 года состоялся визит российской делегации (специалисты ИБРАЭ РАН, ФГУП «НО РАО» и АО «ТВЭЛ») в КНР с посещением штаб-квартиры БРИУГ в Пекине и площадки строительства Бэйшанской ПИЛ в провинции Ганьсу (Gansu province) — Beishan Underground Research Laboratory.

В процессе визита были обсуждены проблемы моделирования и выделены следующие перспективные темы сотрудничества:

- Приложение кодов ИБРАЭ к конкретным задачам.
- Совместное развитие новых методов моделирования. В первую очередь это предложение касается развития подходов DFN, а также соединения подходов трещиноватой и пористой среды для дальнейшей зоны.
- Анализ чувствительности.

В рамках поездки также обсуждалась тема участия ИБРАЭ в Международном проекте по методам мониторинга и оценки гидрологических свойств горных пород в период строительства комплекса подземных сооружений Бэйшань Beishan URL (MONEH — Monitoring and Evaluation Techniques of Hydrologic Response during Excavation of Beishan URL). Подписание соглашения прошло в рамках XIII Международного форума «АТОМЭКСПО 2024».



Рис. 4.2 — Российско-китайская встреча в Бэйшане 6–7 сентября 2023 г.



Рис. 4.3 — Технический тур по площадке строящейся Бэйшанской лаборатории

Сотрудничество с Турецкой Республикой

В 2023 году был реализован контракт между ИБРАЭ РАН и АО «Аккую Нуклеар» (Турецкая Республика) по теме: «Расчёт радиологических последствий для режима нормальной эксплуатации и аварийных режимов АЭС «Аккую» с учётом актуальных параметров площадки расположения АЭС».

Все работы 2023 года завершены в срок и приняты Заказчиком. Планируется продолжение работ по этой тематике в 2024 году.

Сотрудничество с Социалистической Республикой Вьетнам

Сотрудничество между ИБРАЭ РАН и Вьетнамским институтом атомной энергии ВИНАТОМ началось в 2015 году.

В феврале 2023 года состоялся визит президента Вьетнамского института атомной энергии ВИНАТОМ Трань Чи Тханя в ИБРАЭ РАН для обсуждения перспектив сотрудничества между ИБРАЭ РАН и ВИНАТОМом по проекту сооружения Центра ядерной науки и технологии во Вьетнаме. Президента ВИНАТОМа принимал научный руководитель ИБРАЭ РАН академик РАН Л.А. Большов. Они обсудили возможности сотрудничества двух институтов в рамках указанного проекта в области анализа безопасности реакторных установок, рисков и моделирования последствий аварийных ситуаций на радиационно опасных объектах, а также тренинга вьетнамских специалистов, и договорились о дальнейшем взаимодействии. Кроме того, стороны договорились обновить Меморандум о взаимопонимании, поскольку срок действия предыдущего истёк.

Была подготовлена новая редакция Меморандума о взаимопонимании, которая была подписана осенью 2023 года.



Рис. 4.4 — Встреча научного руководителя ИБРАЭ РАН академика РАН Л.А. Большова с президентом ВИНАТОМа Трань Чи Тханем, 15 февраля 2023 г.

СОТРУДНИЧЕСТВО СО СТРАНАМИ СНГ

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

26 сентября 2023 года в Госкорпорации «Росатом» состоялось заседание экспертов Рабочей группы по имплементации Соглашения об информационном взаимодействии государств-участников СНГ при проведении радиационного мониторинга.

От ИБРАЭ РАН в мероприятии принял участие руководитель ЦНТП ИБРАЭ РАН С.Н. Красноперов, выступивший с сообщением: «О Соглашении о взаимодействии государств-участников СНГ при обмене данными мониторинга радиационной обстановки».

Республика Беларусь

На протяжении многих лет ИБРАЭ РАН ведёт сотрудничество с белорусскими организациями по профильным научным направлениям института.

Сотрудничество началось с работ по преодолению радиологических последствий аварии на Чернобыльской АЭС, продолжалось по линии аварийной готовности и реагирования. В настоящее время акцент сотрудничества смещается на проблематику обращения с радиоактивными отходами.

В 2023 году ИБРАЭ РАН при взаимодействии с АО «Техснабэкспорт» выполнил комплекс работ, направленных на обеспечение стратегии обращения с ОЯТ Белорусской АЭС. Были проведены две рабочие встречи с представителями НАН Республики Беларусь в ГНУ «ОИЭЯИ-Сосны» (г. Минск) и одна встреча в ИБРАЭ РАН, на которых демонстрировались и обсуждались достигнутые ИБРАЭ РАН результаты.

В 2023 году началась подготовка проекта программы Союзного государства «Обеспечение безопасности при обращении с радиоактивными отходами», направленной на обеспечение совместной деятельности Российской Федерации и Республики Беларусь, осуществляемой в рамках Комитета Союзного государства. Эта деятельность осуществляется ИБРАЭ РАН совместно с АО «ТВЭЛ» и другими организациями Российской Федерации и Республики Беларусь.

Участие в международных мероприятиях

В 2023 году специалисты ИБРАЭ РАН приняли участие более чем в 60 международных мероприятиях (международные форумы, конференции, семинары, технические и консультативные совещания, заседания комиссий, комитетов и рабочих групп, вебинары), в 15 мероприятиях участвовали очно, в остальных — в дистанционном режиме. Было сделано 48 докладов.



Международный семинар «Проблемы реабилитации площадок ядерного наследия в рамках международных проектов: успешный российский опыт». Модератор первой сессии семинара, зам. директора ИБРАЭ РАН С. В. Антипов и к.ф.-м.н. М.Н. Кобринский. Мурманск, июль 2023 г.

5 Научно-образовательная и издательская деятельность

Институт уделяет большое внимание повышению профессионального уровня и квалификации своих сотрудников, подготовке молодых научных кадров, своевременной и масштабной публикации основных научных и практических результатов, полученных в ходе проводимых в ИБРАЭ РАН научных исследований, 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 2023 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;
- обеспечение водородной взрывобезопасности;
- алгоритмы и численные методы моделирования теплогидродинамики и сопутствующих физических процессов;
- системы радиационно-экологического мониторинга и методы анализа рисков для здоровья населения и окружающей среды;
- программные средства аварийной готовности и реагирования в случае ЧС;
- вопросы экологии и безопасности энергетики.

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 были задействованы ведущие специалисты Института, в числе которых академик РАН Большов Л.А., а также 6 докторов и 7 кандидатов наук.

Ведущими специалистами Института читаются более двадцати кафедральных лекционных курсов. Занятия проводятся в учебно-методическом центре, оборудованном современными компьютерами и средствами оргтехники.

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.

Общий учебный план кафедры

Занятия начинаются на 3 курсе в весеннем семестре. Третьекурсники слушают четыре дисциплины, в том числе обзорный курс «Введение в специальность», в рамках которого ведущие сотрудники Института знакомят студентов со всеми направлениями исследований, проводимых в ИБРАЭ. Это дает студентам возможность выбрать специализацию и научного руководителя.

На 4 курсе студенты слушают шесть лекционных дисциплин, занимаются на семинаре по специальности и работают над дипломным проектом (выпускная квалификационная работа – ВКР), который защищают по окончании 8 семестра, и 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. Магистратура завершается защитой магистерской диссертации и получением степени магистра.

Дисциплины бакалавриата

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

Дисциплины магистратуры:

- аномальные режимы переноса в сильно неоднородных средах;
- гидродинамика многофазных течений;
- моделирование тяжелых аварий;
- основы радиационной биологии;
- системы поддержки и принятия решений;
- феноменология радиационных аварий;
- физика быстропротекающих газодинамических процессов;
- физико-математические модели и программные комплексы в радиоэкологии;
- физические основы радиоэкологии;
- численные методы в механике деформируемого твердого тела.

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.



Заседание секции «Проблемы безопасного развития атомной энергетики» в рамках проведения 65-й Всероссийской научной конференции МФТИ в честь 115-летия Л.Д. Ландау, ИБРАЭ РАН, 5 апреля 2023 года



Директор ИБРАЭ РАН Л.В. Матвеев проводит консультацию с аспирантом



Лекция на кафедре проблем безопасного развития современных энергетических технологий

КАФЕДРА «ТЕХНОЛОГИИ ЗАМКНУТОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА» НИЯУ МИФИ

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

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

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

Примеры курсов на базе ИБРАЭ РАН:

- **Моделирование процессов, протекающих в твэлах.** Рассматриваются основные процессы в топливе и оболочке твэла, определяющие и влияющие на его работоспособность и герметичность при облучении в а.з. реакторных установок на быстрых нейтронах; проводятся практические занятия с кодом нового поколения **БЕРКУТ**.
- **Вычислительные технологии прикладного математического моделирования.** Обсуждаются современные вычислительные технологии, ориентированные на приближенное решение прикладных проблем, математические модели которых базируются на системах уравнений с частными производными; проводятся практические занятия с вычислительной платформой **FEniCS**.
- **Исследования теплогидравлики реакторных установок с водяным и жидкометаллическим теплоносителями.** Обсуждаются общие вопросы моделирования процессов 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;

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 2023 году в аспирантуре ИБРАЭ РАН обучались **22** аспиранта, среди которых — выпускники магистратуры базовой кафедры, а также выпускники МГУ, МИФИ, МЭИ и ряда других ведущих вузов России..



ДИССЕРТАЦИОННЫЙ СОВЕТ

С 1995 года в ИБРАЭ РАН на регулярной основе проводятся защиты кандидатских и докторских диссертаций по тематикам, связанным с проблемами обеспечения безопасности атомной энергетики. В настоящее время в Институте работает диссертационный совет 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 специальности 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).

В состав Диссертационного совета входят ведущие ученые и специалисты ИБРАЭ РАН в области теплофизики и теплогидравлики, нейтронной физики и физики реакторов, математического моделирования, геостатистики, радиоэкологии, обращения с радиоактивными отходами и ОЯТ, разработки систем аварийного реагирования и стратегического планирования.

Возглавляет Совет научный руководитель ИБРАЭ РАН академик **Л.А. Большов**.

За период 1995—2023 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.



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 2023 году его дополнил раздел, посвященный реализации ИБРАЭ РАН политики в области культуры безопасности.

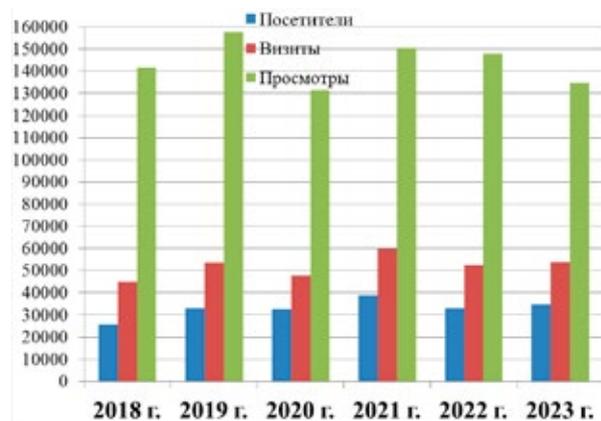
Как следует из статистических данных, полученных с использованием сервиса Яндекс-метрика, интерес к онлайн-ресурсам Института остаётся на стабильно высоком уровне. Количество визитов на сайт в период с 1 января 2023 года по 1 января 2024 года достигло **54000**; численность посетителей сайта в 2023 году составила **34700** человек. Общее количество просмотров активных страниц сайта в период с 1 января 2023 года по 1 января 2024 года превысило **134600** при средней глубине просмотра **2,49** 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, мемуары видных сотрудников Института.

В 2023 году Институтом подготовлено и издано **14** учебных пособий и руководств пользователя по компьютерным кодам нового поколения для проведения VI Школы-семинара в рамках реализации проекта «Коды нового поколения», входящего в состав проектного направления «Прорыв».

Значительное место в научно-издательской деятельности Института занимает публикация препринтов научных трудов сотрудников ИБРАЭ РАН. С 1994 года издано более **300** препринтов, охватывающих все основные направления деятельности Института. В 2023 году опубликован 1 препринт; ряд препринтов готовится к публикации.

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



Посещаемость сайта ИБРАЭ РАН в 2018–2023 гг.

62

НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ

СУММАРНОЕ КОЛИЧЕСТВО
ПУБЛИКАЦИЙ ИБРАЭ РАН
ЗА 2023 ГОД

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.

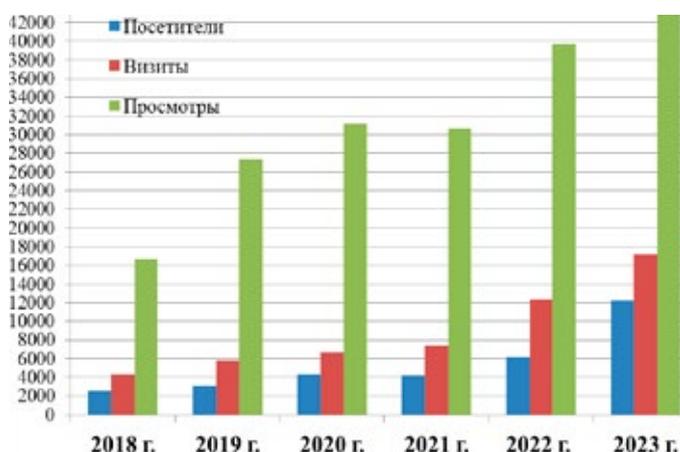
В 2023 году основные усилия в работе редакции научно-технического журнала «Радиоактивные отходы», как и прежде, были направлены на решение таких задач, как консолидация статей по тематике обращения с радиоактивными отходами, вовлечение широкого круга специалистов и ученых к подготовке статей и представлению 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 2023 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 **43%** от общего количества статей, опубликованных в 2023 году в основных российских периодических изданиях, представляющих материалы по данной тематике. Регулярно печаталась информация о наиболее значимых научных мероприятиях.

Авторами статей журнала в 2023 году явились **139** ученых и специалистов, среди которых около **46%** составили работники научных и проектных организаций. В 2022 году их доля была существенно выше и составляла около **70%**. Очевидно это обусловило снижение среднего значения индекса Хирша авторов с **8,8** в 2022 г. до **7.7** в 2023 г. Среди авторов опубликованных статей около **55%** имеют ученые степени, среди них — **20** докторов наук и **54** кандидата наук.

Все опубликованные статьи в полнотекстовом формате размещены в электронной библиотеке РИНЦ. На основании сведений о публикационной активности журнала, представленных РИНЦ за 2021 год, двухлетний **импакт-фактор РИНЦ** журнала составляет **1,488**, а пятилетний — **0,904**, что несколько ниже по сравнению с предыдущим годом (**1,679** и **1,224** соответственно). В общем рейтинге **SCIENCE INDEX** за 2022 г. журнал занимает **954**-е место.

По данным анализа публикационной активности, проводимым РИНЦ, число просмотров статей, опубликованных в журнале за год составило **3953** (в предыдущем году — **3954**). Это говорит о сохранении у целевой аудитории значительного интереса к материалам, публикуемым в журнале, что подтверждается и анализом статистики посещений сайта журнала. В настоящее время на нем размещено **25** номеров на русском языке и **20** номеров,



Посещаемость сайта журнала «Радиоактивные отходы»

45 700

ПРОСМОТРОВ

ЗА 2023 ГОД НА САЙТЕ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО
ЖУРНАЛА «РАДИОАКТИВНЫЕ
ОТХОДЫ»

<http://radwaste-journal.ru>



Распределение публикаций по рубрикам журнала «РАО» в 2023 г.

переведённых на английский язык. За 2023 год количество посетителей сайта составило **11758**, что почти на **90%** больше, чем в предыдущем году. Зарегистрировано **16654** визита, рост по сравнению с 2022 г. составил **35%**, при этом количество просмотров материалов, размещенных на нём, выросло на **12%** и составило **45700**.

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 настоящее время проводится подготовка к включению журнала в базу данных **Russian Science Citation Index (RSCI)** на платформе Web of Science. В соответствии с поручениями редколлегии редакцией журнала усилена работа по рецензированию поступающих рукописей. К настоящему времени все статьи проходят рецензирование, рецензии размещаются на платформе РИНЦ. В 2023 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 журнал прошел перерегистрацию в Перечне российских научных изданий, в которых допускается публикация основных результатов диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук.

Был расширен перечень научных специальностей журнала, который в настоящее время включает следующие специальности по отраслям наук:

1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки),

1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника (технические науки и физико-математические науки),

1.6.6. Гидрогеология (технические науки),

1.6.21. Геоэкология (технические науки и геолого-минералогические науки),

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

2.8.7. Теоретические основы проектирования горно-технических систем (технические науки).

Решением ВАК журнал отнесен к категории К2 Перечня рецензируемых научных изданий.

294 100

ПРОСМОТРОВ

**СУММАРНОЕ КОЛИЧЕСТВО
ЗА 2023 ГОД НА САЙТАХ
ИБРАЗ РАН И ВЫПУСКАЕМЫХ
НАУЧНЫХ ЖУРНАЛОВ**



Распределение статей журнала «Арктика: экология и экономика» по рубрикам в 2023 году

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 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.



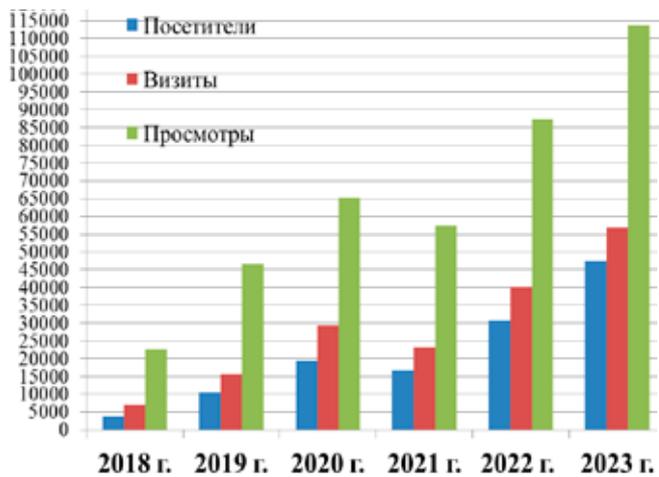
Журналы «Арктика: экология и экономика» за 2023 год

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»

113800

ПРОСМОТРОВ

ЗА 2023 ГОД НА САЙТЕ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО
ЖУРНАЛА «АРКТИКА:
ЭКОЛОГИЯ И ЭКОНОМИКА»,
ВЫПУСКАЕМОГО
ИБРАЭ РАН

<http://arctica-ac.ru>

В 2023 году в 4 выпусках журнала опубликовано 52 научных статьи. В их подготовке приняли участие 167 ученых и специалистов, среди которых 6 академиков и членов-корреспондентов РАН, 23 доктора наук, 78 кандидатов наук (что составляет 64% от общего числа авторов).

По данным РИНЦ за 2022 год, журнал в рейтинге SCIENCE INDEX занимает **149-е место** среди всех российских научных журналов (в 2021 г. журнал занимал **236-е место** в рейтинге) и **2-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 **1,964** (1,848 в 2021 г.), а двухлетний импакт-фактор — **2,602** (2,533 в 2021 г.). По состоянию на январь 2023 года общее число цитирований журнала в РИНЦ — **8004**; количество цитирований в 2022 году составило **708** по сравнению с 658 в 2021 году.

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 2023 года число цитирований статей журнала в международной наукометрической базе данных **SCOPUS** значительно возросло и составило **400** с коэффициентом цитирования (CiteScore) равным **2,1**. 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 сервиса Яндекс-метрика, количество визитов на интернет-сайт журнала (<http://arctica-ac.ru>) в период с 1 января 2023 года по 1 января 2024 года возросло на **41%** по сравнению с аналогичным периодом 2022 года и составило **56800**; число посетителей в 2022 году достигло **47400** человек, увеличившись на 54% по сравнению с 2022 годом. Общее количество просмотров активных страниц сайта в период с 1 января 2023 года по 1 января 2024 года составило **113800** при средней глубине просмотра 2,0 страницы за визит.

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».

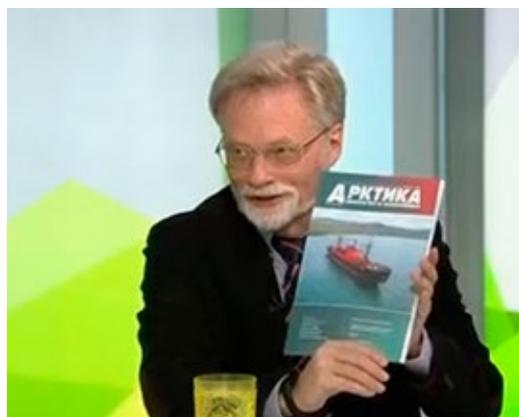
ПОПУЛЯРИЗАЦИЯ НАУКИ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СО СМИ

Сотрудники ИБРАЭ РАН принимают активное участие в информационно-просветительских мероприятиях, направленных на популяризацию атомной энергетики, взаимодействие с общественностью и СМИ в сфере обеспечения безопасности объектов использования атомной энергии.

Институт является участником Национального проекта «Наука и университеты» и осуществляет деятельность в рамках объявленного Президентом РФ В. В. Путиным «Десятилетия науки и технологий в Российской Федерации». Ученые и эксперты Института выступают с докладами и лекциями на научных семинарах, дают интервью СМИ на актуальные темы, связанные с обеспечением безопасности атомной отрасли.

132 КОЛИЧЕСТВО ПУБЛИКАЦИЙ об ИБРАЭ РАН

в ФЕДЕРАЛЬНЫХ ПЕЧАТНЫХ И ИНТЕРНЕТ ИЗДАНИЯХ, ТЕЛЕ- И РАДИО СМИ ЗА 2023 ГОД



Главный редактор журнала «Арктика: экология и экономика», член-корреспондент РАН, д.т.н. В.И. Богоявленский, представляет зрителям журнал «Арктика: экология и экономика» в прямом эфире на телеканале «Культура», 26 октября 2023 года

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.

2 февраля 2023 года прошло отчетно-выборное собрание Совета молодых ученых и специалистов ИБРАЭ РАН. Администрация ИБРАЭ РАН выступила с предложением внести изменения в Положение о СМУиС и расширить состав Совета, увеличив его с **5%** до **10%** от списочной численности молодых сотрудников Института. Данное предложение встретило одобрение среди молодежи, все единогласно проголосовали за расширение Совета. По итогам общего голосования **12** молодых специалистов из разных отделений вошли в состав Совета.

Одной из ключевых задач Совета является стимулирование научной деятельности молодых ученых. На конференции «XXII Школа молодых ученых ИБРАЭ РАН» сотрудниками **15** предприятий было представлено более **60** докладов, что стало рекордом последних лет.



Конференция «XXII Школа молодых ученых ИБРАЭ РАН», май 2023 года

С целью развития и повышения профессиональных компетенций в 2023 году для сотрудников было организовано **6 тренингов**, проводившихся ведущими сотрудниками ИБРАЭ и приглашенными специалистами: «Деловое письмо», «Деловое совещание», «Командная работа», «Подготовка презентации», «Подготовка научной статьи», «Работа с информационным ресурсом Elibrary». Данные тренинги посетили более 100 сотрудников ИБРАЭ.

На Конкурс на лучшую научную работу молодых учёных ИБРАЭ РАН за 2023 год было подано **11 работ**. Они получили высокую оценку конкурсной комиссии. По итогам заседания комиссии присуждено одно первое место, три вторых и три третьих. Торжественное награждение победителей и призеров конкурса провел научный руководитель ИБРАЭ РАН академик Л. А. Большов.

Были проведены **2 научно-познавательные лекции**: «Специальные технологии баз данных» и «Эволюция подходов к управлению выводом из эксплуатации ОИАЭ».

Совместно с инициативной группой были организованы **Весенний и Зимний интеллектуальные турниры**.

В октябре 2023 года Совет молодых ученых принял участие в фестивале **Наука 0+**, где был представлен доклад «Атомная энергетика — окно в будущее».



День здоровья в Битцевском парке



Участники интеллектуального турнира



Технический тур в ИБРАЭ РАН для молодых специалистов НО РАО. Цели тура – расширение информированности о направлениях деятельности ИБРАЭ и обмен опытом между Советами молодых специалистов организаций, 2023 г.

В 2023 году Совет молодых ученых большое внимание уделил здоровью и физическим активностям. При поддержке Профкома были проведены День здоровья и Онлайн Спорт-марафон. В летнее время был проведён ряд тренировок по волейболу.

Для Совета молодых ученых из ФГУП «НО РАО» был организован технический тур в ИБРАЭ РАН, где коллеги познакомились с основными направлениями деятельности ИБРАЭ, а также посетили с экскурсией Технический кризисный центр.

Новым составом СМУиС была продолжена экологическая инициатива по сбору отработанных батареек и аккумуляторов и вывозу их на переработку.

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.



ПЕРВИЧНАЯ ПРОФСОЮЗНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ИБРАЭ РАН

На 1 января 2024 года численность членов местной профсоюзной организации Института (включая сотрудников ИБРАЭ РАН и АНО ЦАБ) составила **320** человека, сохраняя по этому показателю стабильность в течение ряда последних лет. Оперативное руководство осуществлялось Профкомом ИБРАЭ, в состав которого входили **8** сотрудников Института, в том числе представители научной молодежи.

Основные направления деятельности профсоюзного комитета ИБРАЭ в 2023 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**».



8 февраля 2023 года в конференц-зале состоялась отчётно-перевыборная конференция Профсоюзной организации ИБРАЭ РАН, посвящённая выборам нового состава Профкома ИБРАЭ РАН

Список сокращений

- CUDA (Compute Unified Device Architecture) — программно-аппаратная архитектура параллельных вычислений
 CFD-код — компьютерная программа, реализующая вычислительную гидродинамическую модель турбулентности
 PLM — управление жизненным циклом (Product Lifecycle Management)
 а.з. — активная зона реактора
 АЗ — аварийная защита
 АМПРК — автономный малогабаритный пост радиационного контроля
 АСК НДС — автоматизированная система контроля напряженно-деформированного состояния атомной радиации Организации Объединенных Наций
 АСКРО — автоматизированная система контроля радиационной обстановки
 АСММ — атомная станция малой мощности
 БД — база данных
 БН — реактор на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем
 ВВЭР — атомный реактор водо-водяного типа
 ВК — вакуумная камера
 ВЭ — вывод из эксплуатации
 ЖРО — жидкие радиоактивные отходы
 ЗСЖЦ — заключительная стадия жизненного цикла
 ИАС — информационно-аналитическая система
 ИИИ — источник ионизирующего излучения
 ИТЭР (ITER) — Международный экспериментальный термоядерный реактор
 КИРО — комплексное инженерное и радиационное обследование
 МОКС-топливо — (Mixed-Oxide fuel) ядерное топливо, содержащее несколько видов оксидов делящихся материалов
 ОИАЭ — объект использования атомной энергии
 ОНЯТ — объекты новой ядерной техники
 ОЯН — объект ядерного наследия
 ОЯТ — отработавшее ядерное топливо
 ПГЗРО — пункт глубинного захоронения радиоактивных отходов
 ПДК — предельно допустимая концентрация
 ПДХ — пункт длительного хранения
 ПЗРО — пункт захоронения радиоактивных отходов
 ПИЛ — подземная исследовательская лаборатория
 ПН — проектное направление
 ПКОРАО — пункт консервации особых радиоактивных отходов
 ПРОРАО — пункт размещения особых радиоактивных отходов
 РЗГ — радиоактивно загрязненные грунты
 РБ — радиационная безопасность
 РБМК — реактор большой мощности канальный
 РВ — радиоактивные вещества
 РИНЦ — Российский индекс научного цитирования (библиометрическая база данных)
 РКО — расчетный комплекс оптимизации
 РУ — реакторная установка
 СЗЗ — санитарно-защитная зона
 СНУП топливо — смешанное нитридное уран-плутониевое топливо
 СХД — система хранения данных
 ТВС — тепловыделяющая сборка
 твэл — тепловыделяющий элемент
 ТЖМТ — тяжелый жидкометаллический теплоноситель
 ТЯУ — термоядерная установка
 ЯРБ — ядерная и радиационная безопасность
 ЯРОО — ядерно и радиационно опасный объект
 ЯТЦ — ядерный топливный цикл

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