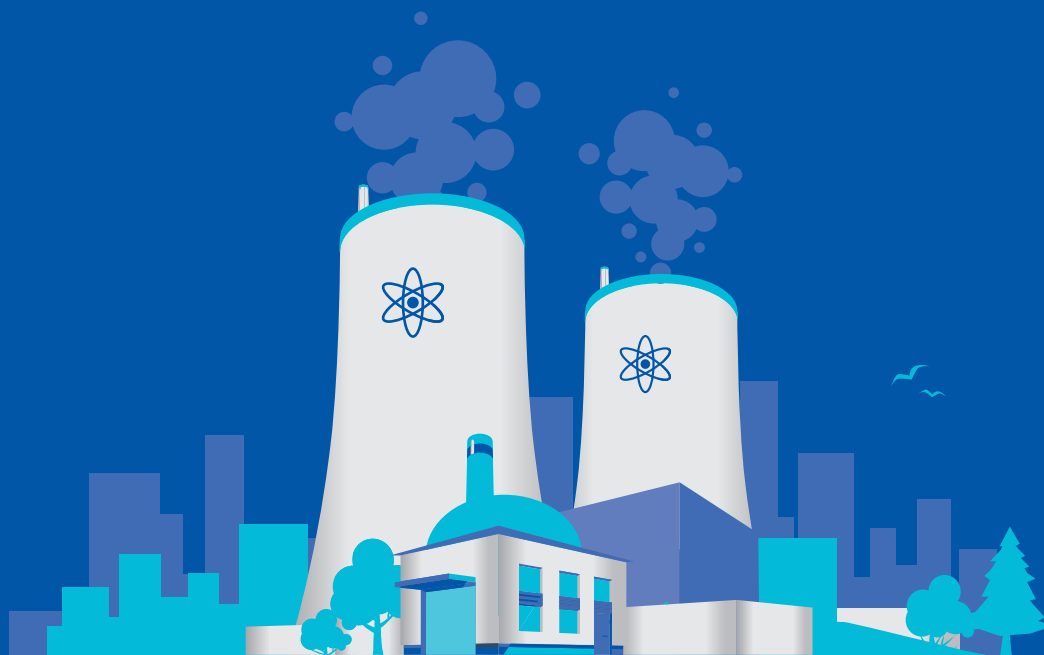




ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
**ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ БЕЗОПАСНОГО РАЗВИТИЯ
АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**



ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТ за **2020** год



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

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТ

за 2020 год

УДК 621.039

ББК 31.4

075

Основные результаты работ за 2020 г. — Под общ. ред. акад. РАН Л. А. Большова; Ин-т проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук (ИБРАЭ РАН). — М., 2021. — 102 с. : ил. — ISBN 978-5-907375-06-2 (в пер.).

Настоящий годовой отчет представляет собой обзор основных направлений научно-исследовательской и научно-организационной деятельности ИБРАЭ РАН за 2020 год. В отчет вошли наиболее значимые результаты работ Института в области: обоснования безопасности АЭС; создания и внедрения в практику современных физических моделей, вычислительных алгоритмов и компьютерных кодов, предназначенных для моделирования процессов в ядерных реакторных установках; обоснования долговременной безопасности завершающих стадий жизненного цикла объектов использования атомной энергии; информационно-аналитического сопровождения разработки и реализации программ в сфере ЯРБ, обращения с ОЯТ и РАО, утилизации и экологической реабилитации объектов атомного флота; обеспечения безопасности населения, оценки и прогнозирования радиационных рисков, разработки научных основ организации систем радиационного мониторинга, аварийного реагирования и ликвидации последствий радиационных аварий; исследований в области теоретической физики, разработки численных методов и современных вычислительных алгоритмов; развития международного сотрудничества в области безопасности атомной энергетики. В отчете также приведены данные о развитии материально-технической базы Института, научно-образовательной и информационно-издательской деятельности ИБРАЭ РАН в 2020 году.

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

ISBN 978-5-907375-06-2

Оригинал-макет подготовлен ИБРАЭ РАН

Подписано в печать 10.08.2021

Формат 60х90 1/8. Уч.-изд. л. 12,75. Усл.-печ. л. 12,5

Тираж 150 экз.



Большов Леонид Александрович

академик РАН,
научный руководитель ИБРАЭ РАН

Дорогие читатели!

В прошлом году мы выпустили первый годовой отчет Института по результатам работы за 2019 год. Отчет оказался интересным для целого ряда специалистов из различных организаций ГК «Росатом», РАН и других ведомств. Мы решили продолжить это начинание. Вашему вниманию предлагается новый отчет Института по результатам его деятельности в 2020 году.

Этот год оказался непростым для всех нас. Мы научились работать на удаленке, хотя привыкли к ежедневному общению и обсуждению хода работы, планов и результатов. В какой-то мере нам удалось заменить эти обсуждения и встречи с сотрудниками других организаций частыми видеоконференциями. Для их проведения у нас уже была отлажена платформа Rolysat, но для видеоконференций с большим числом участников более удобным оказался российский продукт TrueConf.

Мы постоянно работаем над расширением вычислительных возможностей Института, сегодня суммарная мощность вычислительных кластеров превышает 50 Тфлопс, и мы планируем дальнейшее ее увеличение.

Очень важно, что в непростых условиях пандемии и связанных с ней ограничений у всех сотрудников Института не иссякли энтузиазм и интерес к работе, мы сохранились как мощный коллектив, настроенный на успех и дальнейшее развитие. Работали наши образовательные структуры в МФТИ и МИФИ, проводились защиты диссертаций на Диссертационном совете в новом формате: в зале председатель и ученый секретарь совета, а члены совета — на удаленке.

Сотрудники Института продолжали активно развивать международное сотрудничество, участвуя в десятках семинаров и совещаний с зарубежными коллегами. В случае необходимости сотрудники направлялись в командировки по России и за рубеж.

Результаты работ сотрудников ИБРАЭ были отмечены на заседаниях Президиума РАН и руководством ГК «Росатом», МЧС и Минобороны России. Основные результаты, полученные в 2020 году, представлены в настоящем отчете. Отзывы и рекомендации приветствуются!

С уважением,

Л. Большов



Матвеев Леонид Владимирович

д.ф.-м.н.

директор ИБРАЭ РАН

Уважаемый читатель!

В предлагаемом Вашему вниманию отчете представлены основные результаты деятельности ИБРАЭ РАН за 2020 год. Исходя из объема выполненных работ, можно утверждать, что ограничения, связанные с пандемией, не повлияли на интенсивность работ в Институте, в их перечень включены новые направления, коллектив показывает устойчивое развитие.

Как и ранее, к ключевым результатам следует отнести разработку, усовершенствование, подготовку к аттестации и аттестацию большого количества расчетных кодов для анализа и обоснования безопасности объектов использования атомной энергии. Сюда следует отнести пакет нейтронных кодов DOLCE VITA, BPSD, CORNER. В интегральный код ЕВКЛИД/V2, твэльный код БЕРКУТ-У, двухфазный CFD модуль CONV-3D/TwoPhase включены новые модели. Разработан расчетный код для моделирования взаимодействия расплава с бетоном, позволяющий определить выход водорода и его динамику в процессе этого взаимодействия (программа MCCI_4_MCCI). Разработан новый интегральный расчетный код SFPSim/V2.0 для анализа последствий аварий в бассейнах выдержки АЭС с ВВЭР, подготовлен набор документов для его аттестации.

Проведен расчетный анализ напряженно-деформированного состояния защитных оболочек АЭС с РУ ВВЭР-1000 для Ростовской АЭС, разработана экспертная система оценки НДС защитных оболочек АЭС применительно к энергоблокам № 1, 2 и 3 Калининской АЭС.

В рамках проектного направления «Прорыв» разработана модель первого контура энергоблока с РУ БР-1200 в составе интегральной расчетной математической модели (ИРММ) энергоблока с использованием интегрального расчетного кода нового поколения ЕВКЛИД/V1. Выпущен релиз 1.0 системы управления данными и процессами расчетных и экспериментальных научных исследований «УРАНИЯ».

Завершена экспертиза кода СОКРАТ/ВЗ в НТЦ ЯРБ. Специалистами ИБРАЭ выполнялась поддержка работ АО «Атомпроект» СП, использующих код при работе с инозаказчиками (АЭС Пакиш-II, АЭС Эль-Дабба). Проведена модернизация моделей кода СОКРАТ-БН по результатам его эксплуатации АО «ОКБМ Африкантов».

Начато полномасштабное научное сопровождение, в том числе работами на площадке, стратегически важного проекта сооружения ПИЛ и ПГЗРО, активно велись работы по созданию базы знаний, необходимых для реализации проекта. Продолжается развитие системы расчетно-прогностических комплексов (РПК) для решения вопросов обоснования безопасности объектов ЯТЦ, в том числе на этапах их вывода из эксплуатации.

Создана единая информационно-аналитическая система по выполнению мероприятий ФЦП ЯРБ-2 за 2016—2020 гг. (собраны, систематизированы данные, обеспечена поддержка Госкорпорации «Росатом» по оценке эффективности Программы при внесении изменений с учетом финансирования). Определены основные направления повышения эффективности Программы.

В 2020 году в повседневную деятельность Центра научно-технической поддержки ИБРАЭ РАН внедрен современный программный комплекс моделирования переноса радиоактивных веществ в атмосфере, предназначенный для решения задач оценки, анализа и прогноза параметров радиационной обстановки (СОПРО). Специалистами ЦНТП ИБРАЭ РАН совместно со специалистами Отдела анализа безопасности ЯЭУ впервые создана система сквозного моделирования развития аварийных процессов и параметров радиационной обстановки в СЗЗ и ЗН АЭС в случае тяжелых запроектных аварий на АЭС с выходом радиоактивных веществ в атмосферу.

В рамках радиозологических проблем Арктической зоны РФ проведен анализ возможных типов и мест размещения АСММ при освоении Севморпути, сценариев гипотетических аварий с выходом радиоактивных веществ в окружающую среду и разработан комплекс моделей для расчета и анализа радиозологических последствий данных аварийных ситуаций.

В рамках фундаментальных исследований получены новые результаты для моделирования: водородной взрывобезопасности, влияния динамики внутренних волн на перенос радионуклидов в прибрежных водах, влияния коллоидной подсистемы на перенос радионуклидов в резко контрастных средах; создан и верифицирован численный модуль для расчета неклассических процессов на основе разработанного ранее асимптотического метода.

Во многом эффективность работы была обусловлена существенным развитием в 2020 году инфраструктуры Института: создан централизованный кластер виртуальных рабочих мест, обеспечивающий для сотрудников ИБРАЭ РАН возможность работы в дистанционном режиме, внедрена централизованная система видеоконференцсвязи, общая производительность вычислительных ресурсов Института достигла 52 TFlops.

В плане образовательной деятельности активно развивается подготовка студентов НИЯУ МИФИ по профилю «Современные вычислительные методы и программные комплексы для анализа безопасности перспективных проектов АЭС» с использованием учебных версий развиваемых в Институте вычислительных кодов. Также следует отметить, что распоряжением Минобрнауки России от 22 декабря 2020 г. научно-технический журнал «Радиоактивные отходы» включен в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук и ученой степени доктора наук.

Далее в отчете представлены основные результаты, структурированные по направлениям.



Л. В. Матвеев

Содержание



1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ИБРАЭ РАН	8
Коллектив и структура Института в 2020 году	9
Направления научно-исследовательской деятельности Института	11
2. ОСНОВНЫЕ ИТОГИ РАБОТ В 2020 ГОДУ	13
2.1. БЕЗОПАСНОСТЬ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ	14
Разработка программного обеспечения для анализа безопасности атомных станций	14
Анализ безопасности ядерных энергетических установок	23
Расчетно-экспериментальные исследования теплофизических процессов в ядерных установках	26
Информационные технологии управления жизненным циклом объектов атомной энергетики	31
2.2. БЕЗОПАСНОСТЬ ЗАВЕРШАЮЩИХ СТАДИЙ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ОБЪЕКТОВ ЯДЕРНОЙ ТЕХНИКИ	36
Безопасность объектов обращения с ОЯТ, РАО и вывод из эксплуатации ядерных установок	36
Информационная поддержка разработки и реализации программ в сфере ЯРБ	42
Исследование проблем радиационной безопасности объектов атомного флота, АСММ и радиационно опасных объектов исследовательского назначения	50
2.3. БЕЗОПАСНОСТЬ НАСЕЛЕНИЯ	61
Развитие систем аварийной готовности и реагирования	61



2.4. РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ	68
Численные методы и вычислительные алгоритмы.....	68
Теоретическая физика	74
3. РАЗВИТИЕ ИНФРАСТРУКТУРЫ	81
4. МЕЖДУНАРОДНОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО	82
5. НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ И ИЗДАТЕЛЬСКАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ	90
Профильные кафедры.....	90
Кафедра проблем безопасного развития современных энергетических технологий МФТИ	90
Кафедра «Технологии замкнутого ядерного топливного цикла» НИЯУ МИФИ	92
Аспирантура.....	93
Диссертационный совет.....	93
Издательская деятельность	94
Журнал «Радиоактивные отходы»	95
Журнал «Арктика: экология и экономика»	96
6. ОБЩЕСТВЕННЫЕ ОРГАНИЗАЦИИ	99
Совет молодых ученых и специалистов.....	99
Первичная профсоюзная организация ИБРАЭ РАН.....	100
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	101

1 Общие сведения об ИБРАЭ РАН

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

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

В целом за более чем 30 лет своего существования Институт выполнял крупные комплексы работ в интересах российских ведомств и организаций. Среди них МЧС России и Минатом России, ФААЭ, Госкорпорация «Росатом», Ростехнадзор, АО «Концерн Росэнергоатом».

Зарубежными заказчиками работ Института в разные годы выступали Международное агентство по атомной энергии (МАГАТЭ), Европейский банк реконструкции и развития (ЕБРР), Комиссиariat по атомной энергии и Институт радиационной защиты и ядерной безопасности (Франция), Департамент энергетики, Комиссия по ядерному регулированию, Национальная академия наук и национальные лаборатории США, исследовательские и государственные организации Германии, Швеции, Норвегии, Италии и др.

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 ЕГС РАО и методическое обеспечение ее функционирования.

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

- академик РАН А.А. Саркисов удостоен международной премии «Глобальная энергия»;

- пятеро ведущих ученых ИБРАЭ РАН отмечены премиями Правительства Российской Федерации в области науки и техники;
- 15 ученых Института удостоены государственных наград Российской Федерации, среди которых ордена Александра Невского, Почета, Мужества, Дружбы, «За заслуги перед Отечеством» II, III и IV степени;
- почетными знаками МЧС России, Госкорпорации «Росатом» и концерна «Росэнергоатом» было награждено 127 специалистов ИБРАЭ РАН. В 2020 году эти награды получили 7 сотрудников Института.

В 2017 г. была установлена система категорирования академических институтов по ежегодным результатам научно-технической деятельности. В 2017—2020 гг. ИБРАЭ РАН неизменно входил в первую категорию научных организаций.



КОЛЛЕКТИВ И СТРУКТУРА ИНСТИТУТА В 2020 ГОДУ

По состоянию на 1 января 2021 года общая штатная численность ИБРАЭ РАН составляла **561** человек, в том числе **420** сотрудников научных подразделений. Среди них: **4** академика РАН, **1** член-корреспондент РАН, **45** докторов наук и **121** кандидат наук. В Новосибирском филиале ИБРАЭ РАН работало **20** человек, в том числе **17** сотрудников научных подразделений, среди которых **1** член-корреспондент РАН, **2** доктора наук и **3** кандидата наук.

В структуре Института можно выделить три блока подразделений:

БЛОК ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЕЙ И РАЗРАБОТЧИКОВ

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

- 7 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 физи-

420

**СОТРУДНИКОВ
НАУЧНЫХ
ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ,
СРЕДИ НИХ:**

4

АКАДЕМИКА РАН

1

ЧЛЕН-КОРРЕСПОНДЕНТ РАН

45

ДОКТОРОВ НАУК

121

КАНДИДАТ НАУК



Заместитель
директора

О. В. Цацулина

(ovts@ibrae.ac.ru)



Главный
бухгалтер

Е. В. Лукашина

(eluka@ibrae.ac.ru)

ческой гидродинамики из 3-х исследовательских лабораторий.

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

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

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

БЛОК ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ ФИНАНСОВОГО, КАДРОВОГО И ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Эти службы Института ежегодно обеспечивают:

- функционирование всех инфраструктурных систем, в том числе энергоснабжения и систем связи, обеспечивающих непрерывный и надежный прием оперативной информации ведомственной и территориальных АСКРО, данных о состоянии энергоблоков всех российских АЭС и данных Гидрометеоцентра России;
- обслуживание, ремонт и эксплуатацию крупного парка вычислительной техники (включающего персональные компьютеры, рабочие станции, специализированные серверы и иные системы хранения данных, вычислительный кластер), а также парка средств оргтехники;
- договорной, плановой и юридической отделы этого блока в 2020 году обеспечили участие Института в более чем 100 конкурсных

процедурах, а также заключение более 50 контрактов с заказчиками работ и более 100 конкурентных закупок услуг, оборудования и материалов;

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

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

БЛОК ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ НАУЧНО-ОРГАНИЗАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ И МЕЖДУНАРОДНОГО СОТРУДНИЧЕСТВА

Подразделения обеспечивают:

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

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



НАПРАВЛЕНИЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ИНСТИТУТА

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

ИБРАЭ РАН является единственным институтом Российской академии наук, специализирующимся в области комплексных исследований проблем безопасности объектов атомной энергетики и промышленности.

В Институте сформирован высококвалифицированный творческий коллектив, уникальной особенностью которого является оптимальное сочетание специалистов в области теоретической и экспериментальной физики, ядерной энергетики, биофизики, радиоэкологии, вычислительной математики и информатики.

В 2020 году ИБРАЭ РАН осуществлял научно-исследовательскую и организационную деятельность в следующих основных направлениях:

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

- разработка физико-математических моделей, современных численных методов и вычислительных алгоритмов для использования в задачах обоснования безопасности атомных реакторных установок и прогнозирования распространения радионуклидов в окружающей среде;
- расчетно-теоретические исследования задач водородной взрывобезопасности и геофизической гидродинамики;
- теоретические исследования процессов тепло- и массопереноса и исследования в смежных областях физики;

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

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

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

- комплексный мониторинг эффективности реализации федеральных целевых программ в сфере ЯРБ, нормативно-методическая поддержка планирования и выполнения мероприятий в сфере ЗСЖЦ, создание цифровых информационных моделей площадок и объектов для задач комплексного планирования ВЭ и обращения с РАО;
- разработка и применение расчетно-методического инструментария оценки безопасности объектов ядерного топливного цикла; исследования, направленные на обеспечение дол-

современной безопасности подземной исследовательской лаборатории и пункта глубокого захоронения радиоактивных отходов в Нижнеканском массиве;

- работы по эксплуатации информационной системы управления Программой комплексной утилизации объектов атомного флота, исследования радиоэкологических проблем Арктической зоны Российской Федерации, реконструкция и оценка последствий ядерных аварий на АПЛ, научно-организационное и аналитическое сопровождение работ по повышению радиационной безопасности объектов РАН.

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 воздушной среде;
- разработка информационных систем и программно-технических комплексов для оценки, анализа и прогноза радиологических последствий нештатных/чрезвычайных ситуаций радиационного характера;
- обеспечение через Центр научно-технической поддержки ИБРАЭ РАН научно-технической и экспертной поддержки мероприятий по аварийному реагированию на ЧС с радиационным фактором, осуществляемых на отраслевом, региональном и федеральном уровнях.

Исследования социально-экономических аспектов развития атомной энергетики:

- участие в разработке и реализации мероприятий по системно-аналитическому сопровождению и информационной поддержке программ ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС;
- работы по подготовке Российского национального доклада, приуроченного к 35-й годовщине чернобыльской аварии;
- разработка и реализация информационно-просветительских мероприятий по взаимодействию с общественностью в сфере обеспечения безопасности объектов использования атомной энергии;

ИБРАЭ РАН осуществляет широкое научное сотрудничество с ведущими российскими, зарубежными и международными организация-

12 ОКТЯБРЯ 2020 ГОДА

УКАЗОМ ПРЕЗИДЕНТА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ «О НАГРАЖДЕНИИ ГОСУДАРСТВЕННЫМИ НАГРАДАМИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ» ЗА БОЛЬШИЕ ЗАСЛУГИ В НАУЧНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ И МНОГОЛЕТНЮЮ ДОБРОСОВЕСТНУЮ РАБОТУ СОВЕТНИК РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК АКАДЕМИК

**АШОТ АРАКЕЛОВИЧ САРКИСОВ
НАГРАЖДЕН ОРДЕНОМ
«ЗА ЗАСЛУГИ ПЕРЕД
ОТЕЧЕСТВОМ» II СТЕПЕНИ**

ми, в числе которых Ростехнадзор, Госкорпорация «Росатом», АО «Атомэнергопром», АО «ТВЭЛ», АО «Концерн Росэнергоатом», МЧС России, НЦУО и ВМФ МО РФ, Комиссариат по альтернативной и атомной энергии и Институт радиационной защиты и ядерной безопасности Франции, Ядерный исследовательский центр в Карлсруэ (Германия), Международное агентство по атомной энергии, Всемирная ядерная ассоциация, Агентство по атомной энергии Организации экономического сотрудничества и развития и многие другие организации.

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

В 2020 году, в связи со сложной санитарно-эпидемиологической обстановкой и связанной с этим ограничениями, Институт уделял особое внимание организации и обеспечению эффективной работы научных и административно-технических подразделений, диссертационного совета и профильных кафедр в режиме дистанционной работы сотрудников.

2

Основные итоги работ научных подразделений в 2020 году



Разработка программного обеспечения для анализа безопасности атомных станций



Информационная поддержка разработки и реализации программ в сфере ЯРБ



Анализ безопасности ядерных энергетических установок



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



Расчетно-экспериментальные исследования теплофизических процессов в ядерных установках



Развитие систем аварийной готовности и реагирования



Информационные технологии управления жизненным циклом объектов атомной энергетики



Численные методы и вычислительные алгоритмы



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



Теоретическая физика

2.1. БЕЗОПАСНОСТЬ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ



РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА БЕЗОПАСНОСТИ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ



НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ
НАПРАВЛЕНИЯ

Заместитель директора

В. Ф. Стрижов

д.ф.-м.н.

(vfs@ibrae.ac.ru)



Заведующий отделением

Н. А. Мосунова

д.т.н.

(nam@ibrae.ac.ru)

КЛЮЧЕВЫЕ СПЕЦИАЛИСТЫ

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

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

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

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

Д.А. Колташев — разработка моделей и ПК для нейтронно-физического расчета;

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

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

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

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

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 И ДР.)
- 2** РАЗРАБОТКА КОМПОНЕНТОВ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ АЭС, В ЧАСТНОСТИ, ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА «ВИРТУАЛЬНО-ЦИФРОВАЯ АЭС С ВВЭР», ИНТЕГРАЛЬНОЙ РАСЧЕТНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭНЕРГОБЛОКА С РУ БР-1200 И ИНТЕГРАЛЬНОЙ РАСЧЕТНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОДЭК С РУ БРЕСТ-ОД-300
- 3** РАЗРАБОТКА, ВАЛИДАЦИЯ И АТТЕСТАЦИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ РАСЧЕТНЫХ КОДОВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ АЭС С РЕАКТОРНЫМИ УСТАНОВКАМИ ТЕХНОЛОГИИ ВВЭР И РБМК, ВКЛЮЧАЯ ВОЗМОЖНОСТЬ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЯЖЕЛЫХ АВАРИЙ
- 4** ВЫПОЛНЕНИЕ РАСЧЕТОВ АЭС С РЕАКТОРНЫМИ УСТАНОВКАМИ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ ИХ БЕЗОПАСНОСТИ ИЛИ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНЫХ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ
- 5** РАЗРАБОТКА МЕТОДИК, МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И РАСЧЕТНЫХ КОДОВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЗАЩИТНЫХ ОБОЛОЧЕК АЭС РАЗЛИЧНОГО ТИПА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ И АВАРИЙНЫХ НАГРУЗОК

ОСНОВНЫЕ ИТОГИ 2020 ГОДА

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

- завершена разработка и аттестация в Ростехнадзоре пакета современных кодов для расчета нейтронно-физических характеристик реакторных установок на быстрых нейтронах: кода на базе диффузионного приближения **DOLCE VITA**, позволяющего учитывать гетерогенность материального состава ТВС, кода нуклидной кинетики, расчета активности и остаточного энерговыделения **BPSD**, кода на базе приближения дискретных ординат (S_n) на структурированных сетках **CORNER**;
- в состав интегрального кода **ЕВКЛИД/V2**, предназначенного для моделирования режимов нормальной эксплуатации и нарушений нормальной эксплуатации (включая тяжелые аварии) АЭС с реакторными установками с

жидкометаллическим теплоносителем, включены модули, описывающие процессы **горения натрия** в помещениях АЭС, **взаимодействия расплава** (кориума и свинца) **с бетоном** (рис. 2.1.1), **удержания и расхолаживания расплава** в корпусе реактора с учетом теплообмена с внутрикорпусными конструкциями, а также модуль для расчета возможности возникновения **вторичной критичности** при тяжелой аварии;

- в твэльный код **БЕРКУТ-У** включены модели **двумерной теплопроводности, деформационного поведения топливных таблеток со сквозными радиальными и окружными трещинами**; модель радиационно-индуцированной сегрегации **бинарного ферритно-мартенситного сплава Fe-Cr**, обобщенная для учета структуры границ зерен, а также взаимодействия дефектов решетки с дислокациями; модель радиационно-индуцированной сегрегации для **аустенитной стали Fe-Ni-Cr**;
- в двухфазный CFD модуль **CONV-3D/TwoPhase** включены двух- и трехкомпонентные модели,

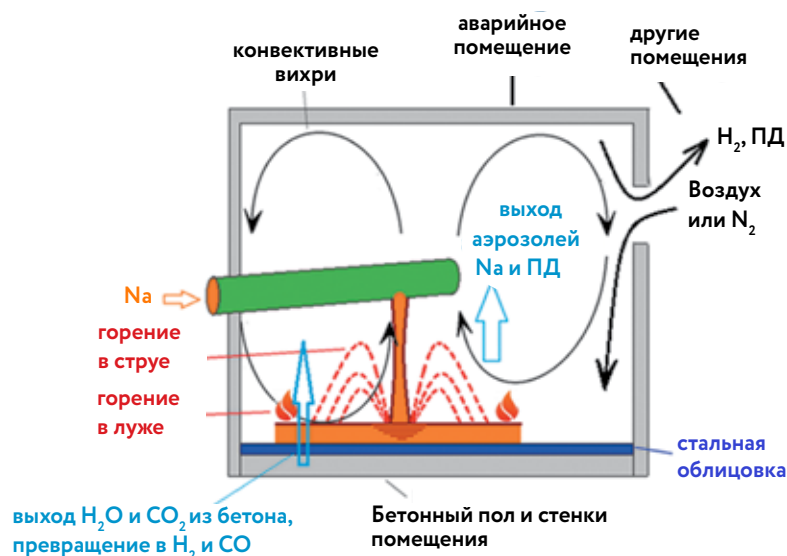


Рисунок 2.1.1 – Схема явлений переноса тепла и продуктов горения натрия при аварии с разрывом участка трубопровода с натрием

позволяющие учитывать расслоение двухфазного потока и сепарацию газовой компоненты через поверхность раздела. Модуль адаптирован для проведения расчетов на гибридных (CPU+GPU) ЭВМ;

- выпущены учебные пособия и учебные версии по кодам нового поколения **BPSD/E1.0** и **DOLCE VITA/E1.0**. В центре компетенций по наукоемким технологиям Госкорпорации «Росатом» на базе АО «НИКИЭТ» специалистами ИБРАЭ РАН проведена **IV Школа-семинар по кодам нового поколения**, разработанным в проекте «Коды нового поколения» проектного направления «Прорыв» (рис. 2.1.2). В 2020 году Школа-семинар была проведена не только в традиционном очном формате с соблюдением противоэпидемических требований, но также и в новом — дистанционном. Занятия прошли по **8** учебным версиям кодов нового поколения, в Школе-семинаре приняли участие **53** специалиста из **11** организаций.

2. Разработка расчетного кода для анализа последствий аварий с потерей охлаждения или охлаждающей жидкости в бассейнах выдержки АЭС с РУ ВВЭР (работы выполнены по заказу АО «ВНИИАЭС», генеральный заказчик — АО «Концерн Росэнергоатом»).

В ИБРАЭ РАН разработан интегральный расчетный код **SFPSim/V2.0**, предназначенный для расчетного анализа аварий с потерей охлаждения или охлаждающей жидкости в бассейнах выдержки (БВ) АЭС с РУ ВВЭР. Актуальность разработки связана с отсутствием в России интегрального расчетного кода, позволяющего моделировать аварии с повреждением топлива в бассейне выдержки.

Программа состоит из следующих основных модулей:

- теплогидравлический модуль **HYDRA-IBRAE/H2O**;
- твэльный модуль **SFPR/C++**;
- модуль для описания процессов разрушения элементов бассейна выдержки **HEFEST_CORE**;
- модуль для описания поведения продуктов деления в бассейне выдержки и помещениях АЭС **AERCONT**;
- модуль для определения остаточного энерговыделения **NEUTRON_3D**.

Согласованный расчет модулей, а также ввод и вывод информации обеспечиваются системной оболочкой.

В 2020 году завершён первый этап валидации кода **SFPSim/V2.0**, а также выпущен полный набор обосновывающих материалов, необходимых для подачи кода на аттестацию, начало которой запланировано на январь 2021 года.

Разработка программы **SFPSim/V2.0** была выполнена в очень сжатые сроки: **весь цикл работ от выпуска детальных технических требований до подачи кода на аттестацию был завершён за 1,5 года**. Это стало возможным благодаря использованию в качестве основы для доработки компонентов ПТК «Виртуально-цифровая АЭС с ВВЭР», имеющих гибкую архитектуру и широкие возможности развития, уже валидированных на представительном наборе данных, включающем данные с действующих энергоблоков, а также с интегральных экспериментальных стендов.



**В IV Школе-семинаре
приняли участие:**

53 СПЕЦИАЛИСТА
из
11 ОРГАНИЗАЦИЙ

Занятия прошли по

8 УЧЕБНЫМ ВЕРСИЯМ
КОДОВ НОВОГО
ПОКОЛЕНИЯ



Рисунок 2.1.2 — IV Школа-семинар пользователей кодов нового поколения: а) зона регистрации; б) учебные пособия

Адаптация под процессы, протекающие в бассейне выдержки, потребовала развития таких моделей, как испарение с поверхности, расчет критического теплового потока в области малых давлений и расходов, окисление циркониевых оболочек в воздушной среде, радиолиз воды и других. При валидации особое внимание было уделено проверке корректности моделирования именно новых доработанных моделей (рис. 2.1.3, 2.1.4).

После аттестации планируется внедрение программы в производственный процесс предприятий Госкорпорации «Росатом».

3. Разработка расчетного кода для моделирования взаимодействия расплава с бетоном, позволяющего определить выход водорода и его динамику в процессе этого взаимодействия (работы выполнены по заказу АО «ВНИИАЭС», генеральный заказчик — АО «Концерн Росэнергоатом»)

Программа MCCI_4_MCCI предназначена для моделирования взаимодействия расплава с бетоном шахты водо-водяного реактора ВВЭР или бассейна выдержки в процессе запроектной тяжелой аварии. Рассчитываются количественные характеристики этого взаимодей-

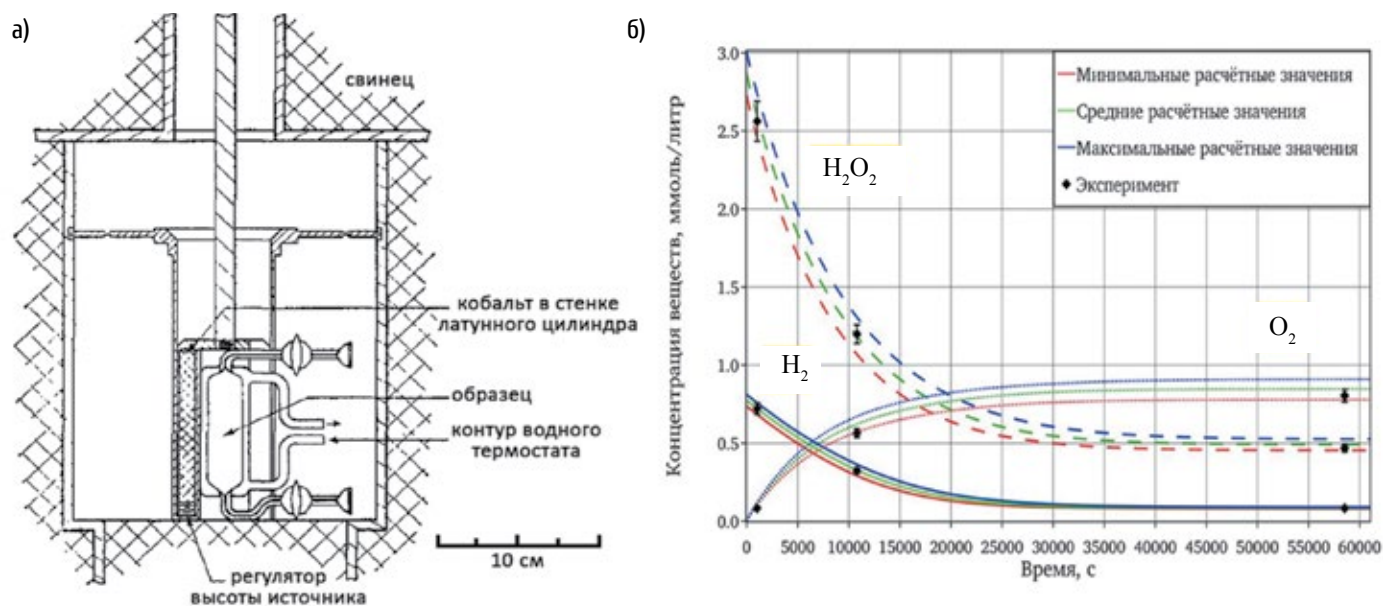


Рисунок 2.1.3 — Изменение со временем концентрации водорода, пероксида водорода и кислорода в растворе в канале при начальном значении $[H_2]_0 = 0,87 \text{ M}$, $[O_2]_0 = 0$ и $[H_2O_2]_0 = 2,87 \text{ M}$ в эксперименте по изучению гамма-радиолиза воды
а) схема установки для облучения растворов гамма-излучением; б) результаты расчетов для водорода, кислорода и пероксида водорода в сравнении с экспериментом

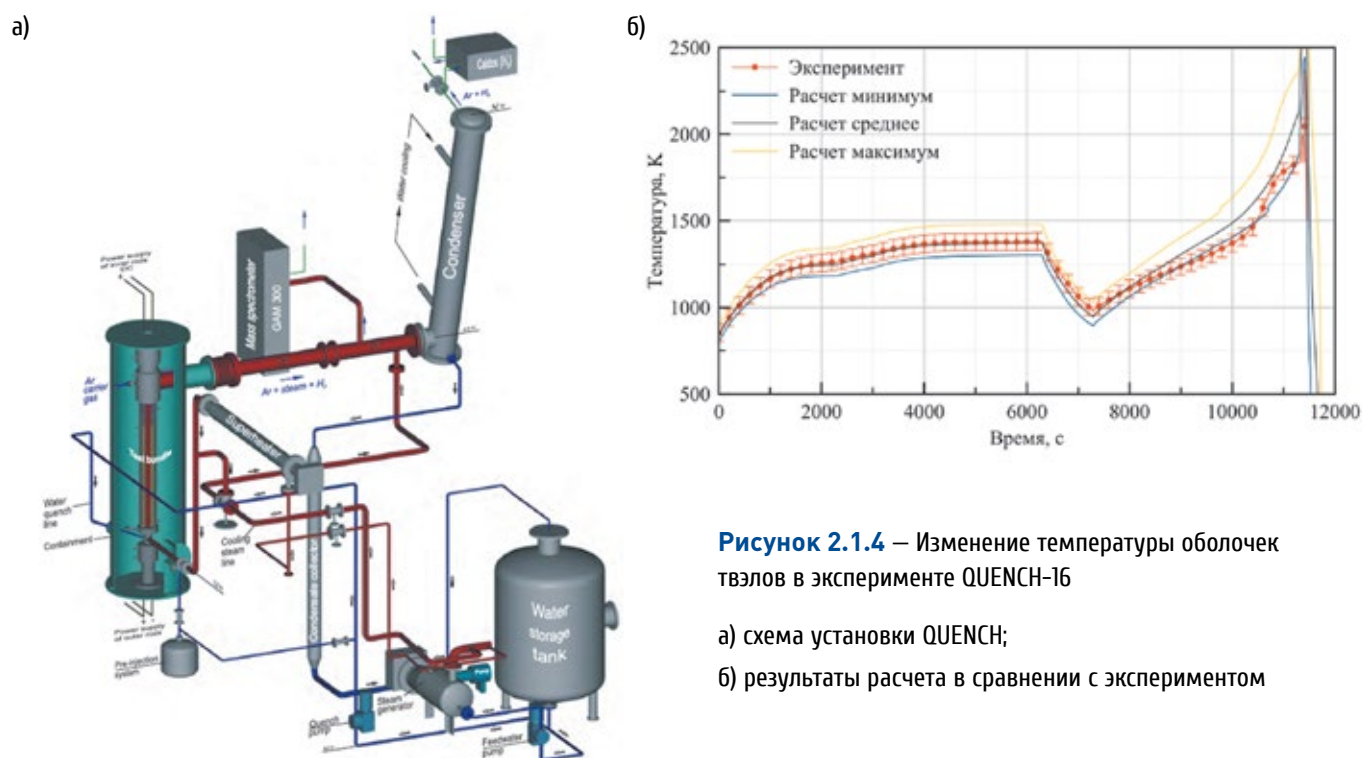


Рисунок 2.1.4 — Изменение температуры оболочек твэлов в эксперименте QUENCH-16
а) схема установки QUENCH;
б) результаты расчета в сравнении с экспериментом

ствия, существенные для анализа безопасности АЭС: скорости генерации горючих газов (водорода и монооксида углерода) и полный объем их выхода в гермообъем, степень повреждения стен и перекрытий конструкций бетонной шахты реактора и прилегающих помещений, а при рассмотрении аварий в бассейне выдержки — бетонного пола бассейна. На основе расчета долговременной эволюции состояния расплава и контактирующих с ним конструкций АЭС может быть сделан вывод о

времени стабилизации теплового режима конструкций.

Программа прошла верификацию на аналитических тестах и валидацию на экспериментах. Результаты расчетов демонстрируют хорошее совпадение с экспериментальными данными по скорости генерации горючих газов и скорости эрозии бетона (рис. 2.1.5). Подготовлены обосновывающие материалы по программе для прохождения аттестации, начало которой запланировано на 2021 год.

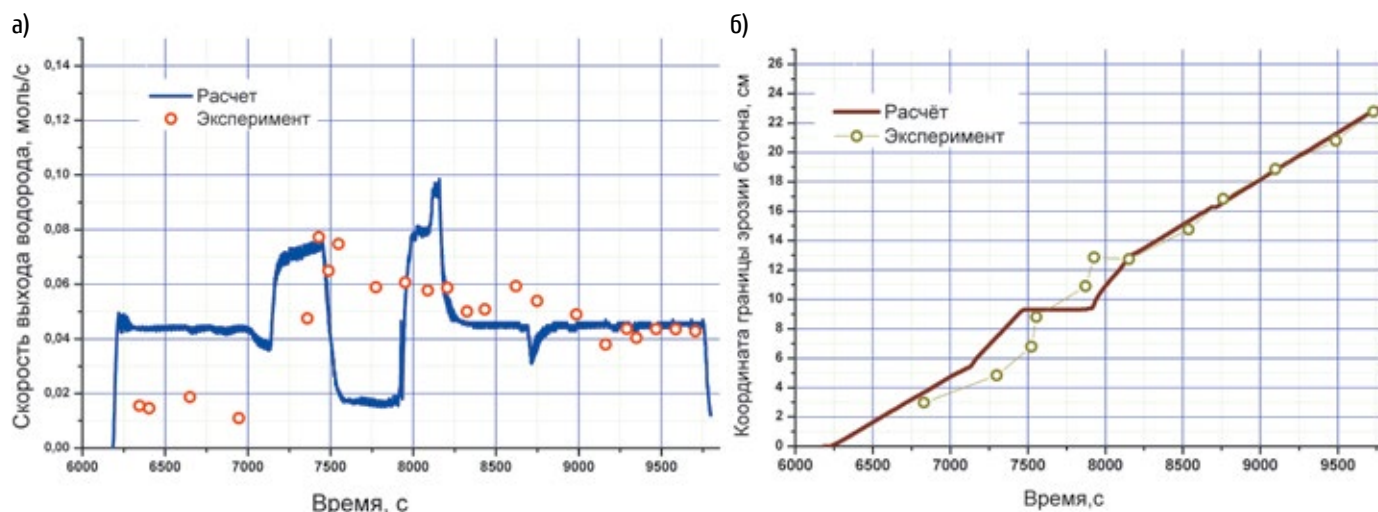


Рисунок 2.1.5 — Результаты моделирования эксперимента SURC-4 (SNL, США)

а) скорость выхода водорода; б) положение границы эрозии бетона

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

В 2020 году выполнена работа по обоснованию достаточности количества стабильно работающих датчиков для оценки напряженно-деформированного состояния (НДС) защитной оболочки блока № 1 Ростовской АЭС. В рамках данной задачи была разработана и согласована с Генпроектировщиком защитной оболочки (АО «Атомэнергопроект») методика оценки работоспособности струнных измерительных преобразователей (СИП). По итогам работы показано, что имеющегося количества стабильно работающих датчиков контрольно-измерительной аппаратуры (КИА) достаточно для оценки НДС защитной оболочки при дальнейшей ее эксплуатации. Отсутствие стабильно работающих датчиков КИА в отдельных зонах оболочки компенсируется расчетом с использованием детальной расчетной модели.

В рамках договора между АО «Контрольприбор» и ИБРАЭ РАН разработана экспертная система оценки напряженно-деформированного состояния защитных оболочек АЭС применительно к энергоблокам № 1, 2 и 3 Калининской АЭС. В 2021 году экспертная система будет установлена на Калининской АЭС и передана в эксплуатацию.

Также ИБРАЭ РАН в рамках плана НИР выполнен расчет и анализ НДС ЗО АЭС при воздействии эксплуатационных, аварийных и сейсмических нагрузок с использованием разработан-

ных численных методик и метода суперэлементов для случаев максимально и минимально допустимого уровней обжатия защитной оболочки системой преднапряжения. Выполнен анализ результатов расчета напряженного состояния ЗО при особых сочетаниях нагрузок: нормальные условия эксплуатации (НУЭ) плюс максимальное расчетное землетрясение (МРЗ) и сочетание проектная авария (ПА) плюс МРЗ. Трехмерные распределения суммарных силовых факторов (усилий и моментов) в защитной оболочке при воздействии особого сочетания нагрузок в самый опасный момент времени от начала аварии приведены на рис. 2.1.6.

Выполнен расчет прочности защитной оболочки, расчет по образованию и раскрытию трещин в бетоне защитной оболочки. Расчеты НДС защитной оболочки показали, что минимальный уровень преднапряжения достаточен для восприятия защитной оболочкой всех предусмотренных проектом нагрузок и воздействий, а сейсмостойкость ЗО обеспечивается в соответствии с требованиями НП-031-01.

5. Разработка модели первого контура энергоблока с РУ БР-1200 в составе интегральной расчетной математической модели энергоблока (работы выполнены по заказу АО «Прорыв»).

РУ БР-1200 разрабатывается как коммерческая реакторная установка для крупномасштабной ядерной энергетики естественной безопасности. Основные конструкторские и технические решения РУ БР-1200 базируются на технических решениях, принятых для РУ БРЕСТ-ОД-300. Интегральная расчетная математическая модель энергоблока с РУ БР-1200 (ИРММ) предназначена для динамического мо-

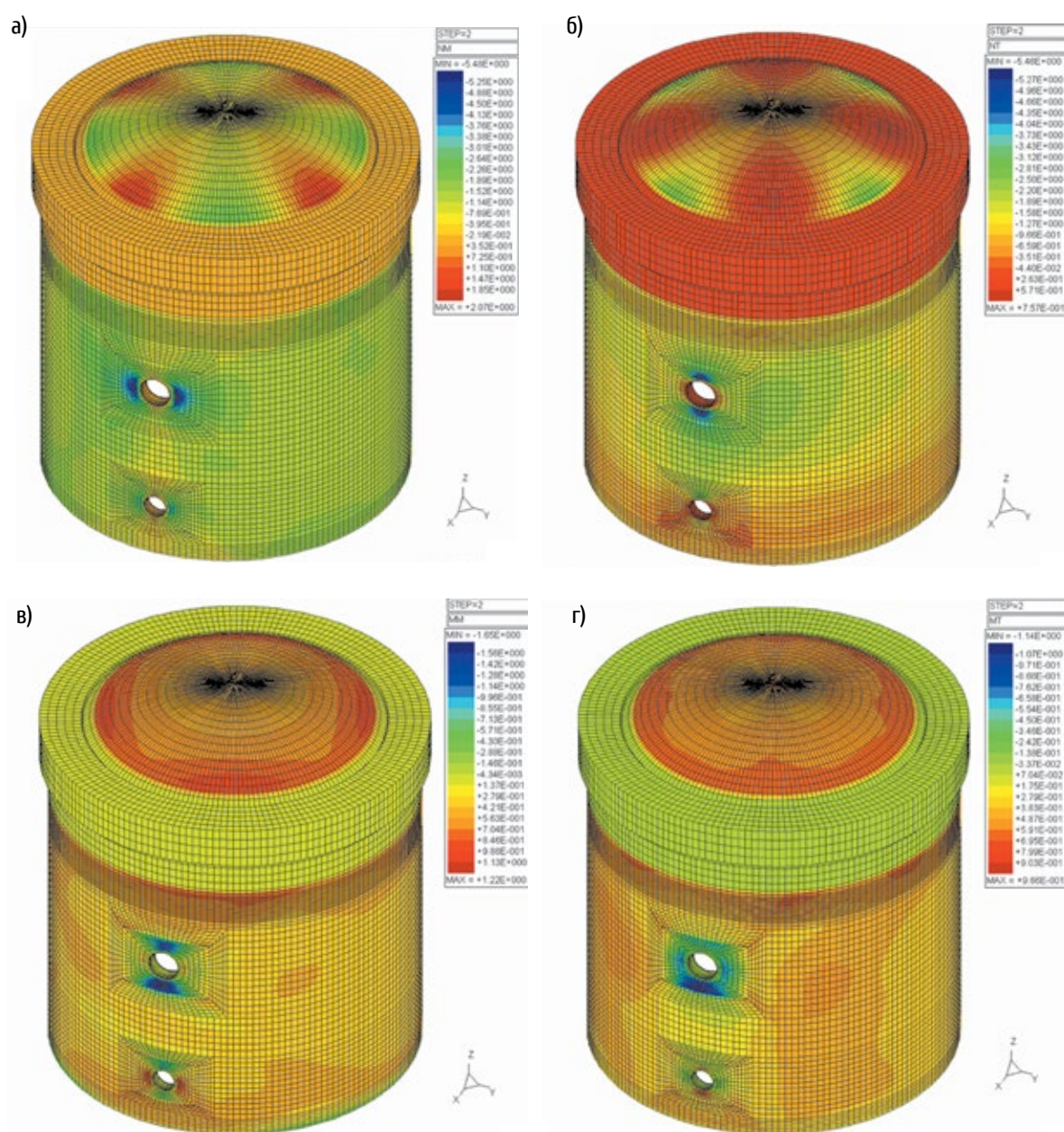


Рисунок 2.1.6 — Распределение меридиональных (а) и кольцевых (б) усилий (MN/m), меридиональных (в) и кольцевых (г) моментов ($MN \times m/m$) в защитной оболочке от суммарного воздействия особого сочетания нагрузок в самый опасный момент аварии (30 минут от начала)

делирования работы энергоблока с РУ БР-1200 в номинальном и ряде переходных и аварийных режимов. Она должна использоваться для расчетной апробации проектных решений, то есть расчетов, позволяющих выявить возможные коллизии по технологическим параметрам, а также для поиска возможных путей устранения таких коллизий.

В 2020 году была начата и завершена работа по созданию модели первого контура энергоблока с РУ БР-1200 с использованием интегрального расчетного кода нового поколения

ЕВКЛИД/V1 (рис. 2.1.7). Также была успешно проведена интеграция этой модели с остальными частными математическими моделями, входящими в состав ИРММ — паротурбинной установки и систем 2-го контура, системами визуализации и управления ИРММ энергоблока. В режиме реального времени выполнен демонстрационный расчет номинального режима работы РУ, который подтвердил корректную работу связанной теплогидравлической и нейтронно-физической модели 1-го контура.

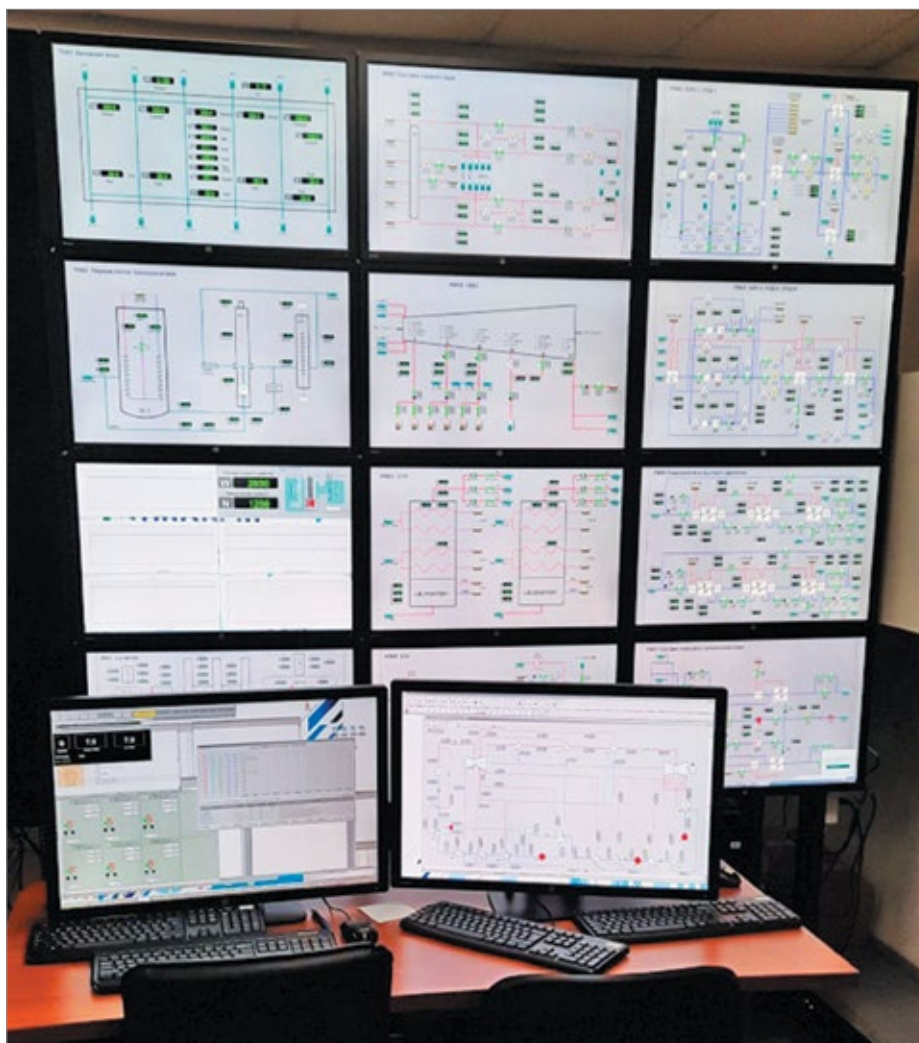


Рисунок 2.1.7 — Первые панели оператора в начале создания интегральной расчетной математической модели энергоблока с РУ БР-1200

Полученные специалистами Отделения результаты научно-исследовательских работ были представлены на **ведущих российских и международных конференциях**, на которых получили высокую оценку научного сообщества. Приведем некоторые из них:

- **Международная конференция «Марчуковские научные чтения 2020»** (МНЧ-2020), 19—23 октября 2020 г., Академгородок, Новосибирск, Россия. Конференция, посвященная актуальным вопросам суперкомпьютерного моделирования, вычислительной и прикладной математики, проводилась в дистанционном формате. Заведующий лабораторией ИБРАЭ РАН профессор **Вабищевич П. Н.** представил пленарный доклад, в котором был дан обзор современного состояния исследований по численному решению краевых задач с дробной степенью эллиптических операторов. Многие нелокальные математические модели процессов и явлений приводят к таким неклассическим задачам. Приближенные методы базируются на том или ином варианте перехода к последова-

тельности стандартных краевых задач для эллиптических уравнений.

- **XVI Международная научно-практическая конференция «Безопасность ядерной энергетики»**, 12—13 ноября 2020 г., Волгодонск: ВИТИ НИЯУ МИФИ. На конференции рассматривались вопросы проектирования, строительства и эксплуатации энергоблоков, экологической и радиационной безопасности АЭС. Конференция проводилась в дистанционном формате. Заведующий лабораторией ИБРАЭ РАН **Медведев В. Н.** представил доклад, в котором описал методологию моделирования преднапряжения внутренней защитной оболочки проекта АЭС-2006 в соответствии с порядком натяжения арматурных канатов на реальном объекте. Полученные данные показывают, что после завершения преднапряжения усилия в армоканатах распределены неравномерно, даже если в процессе натяжения каждого из канатов на домкрате усилия были одинаковые. Это необходимо учитывать при обосновании эксплуатационной пригодности ЗО на

воздействие испытательной и эксплуатационной нагрузок.

- **The IAEA Technical Meeting on Fuel Failure in Normal Operation of Water Reactors: Experience, Causes and Mitigation.** 14—18 декабря 2020 г., Вена, Австрия. Цель онлайн-конференции состояла в обмене данными, опытом и новыми результатами, имеющими отношение к отказу твэлов при нормальной эксплуатации тепловых реакторов. В докладе старшего научного сотрудника ИБРАЭ РАН **В. И. Тарасова** была представлена недавно разработанная усовершенствованная модель

массообмена в свободном объеме дефектных твэлов тепловых реакторов с учетом диссоциации пара, радиолиза пара, окисления оболочки твэла и выхода газообразных продуктов деления в теплоноситель. Представлен программный комплекс, включающий в себя численную реализацию модели в связке с топливным кодом MFPR/R. На примере моделирования выхода изотопов криптона, йода и ксенона в теплоноситель из дефектных твэлов при облучении в реакторе NRX CRNL было показано хорошее согласие результатов расчетов с экспериментальными данными.

КЛЮЧЕВЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАБОТ

1. Mosunova N. A., Alipchenkov V. M., Pribaturin N. A., Strizhov V. F., Usov E. V., Lobanov P. D., Afremov D. A., Semchenkov A. A., Larin I. A. Lead coolant modeling in system thermal-hydraulic code HYDRA-IBRAE/LM and some validation results // Nuclear Engineering and Design, 2020. Vol.359. № 1104631. 11 p. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2019.110463>.
2. Veprev D. P., Boldyrev A. V., Chernov S. Yu. Validation of the BERKUT fuel rod module against mixed nitride fuel experimental data // Annals of Nuclear Energy, 2020. Vol. 135. 106963. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2019.106963>.
3. Vabishchevich P. N. Incomplete iterative implicit schemes // Computational Methods in Applied Mathematics, 2020. no. 4. P. 727–737. <https://doi.org/10.1515/cmam-2018-0295>.
4. Fichot F., Carénini L., Bakouta N., Esmaili H., Humphries L., Laatoe T., Tellier R. Le, Saas L., Melnikov I., Pandazis P., Weber S., Park R. J., Filippov A., Strizhov V. Elaboration of a Phenomena Identification Ranking Table (PIRT) for the modelling of In-Vessel Retention // Annals of Nuclear Energy, 2020. Vol. 146, 107617. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2020.107617>.
5. Vabishchevich P. N. Approximation of a fractional power of an elliptic operator // Numer Linear Algebra Appl, 2020. Vol. 27. Iss. 3. e2287. P.1–14. <https://doi.org/10.1002/nla.2287>.
6. Колташев Д. А. Моделирование активной зоны реактора со свинцовым теплоносителем при попадании водяного пара с помощью кода ЕВКЛИД/V1 // Атомная энергия, 2020. Т. 128. № 2. С. 114–116.
7. Алипченков В. М., Грудцын Я. В., Мосунова Н. А. Моделирование переноса газовой фазы в потоке тяжелого жидкометаллического теплоносителя в теплогидравлическом коде HYDRA-IBRAE/LM // Атомная энергия, 2020. Т. 129. № 3. С. 134–141.
8. Чуданов В. В., Аксенова А. Е., Первичко В. А. Адаптация однофазного CFD DNS модуля CONV-3D для моделирования турбулентных течений в реакторных установках в LES приближении // Атомная энергия. 2020. Т. 128. № 6. С. 315–318.
9. Медведев В. Н., Киселев Александр С., Киселев Алексей С., Стрижов В. Ф., Ульянов А. Н., Скоринова М. И., Пимшин Ю. И. К вопросу о контроле защитных оболочек АЭС в период приемо-сдаточных испытаний // Глобальная ядерная безопасность, 2020. №2 (35), С. 42–54.
10. Болдырев А. В., Озрин В. Д., Тарасов В. И. Обзор современного состояния исследований по моделированию процессов в оболочках твэлов быстрых реакторов // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Материаловедение и новые материалы, 2020. Вып. 3 (104). С. 94–122.
11. Белов А. А., Бикеев А. С., Дайченкова Ю. С., Шкаровский Д. А. Оценка радиационной безопасности транспортного контейнера при перевозке отработавшего нитридного уран-плутониевого топлива БН-600 с использованием программы MCU-FR // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы, 2020. № 2. С. 85–95.



АНАЛИЗ БЕЗОПАСНОСТИ ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК



**НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ
НАПРАВЛЕНИЯ**

Научный руководитель
ИБРАЭ РАН

Л. А. Большов

академик РАН
(bolshov@ibrae.ac.ru)



**Заведующий
отделением**

А. Е. Киселев

д.т.н.
(ksv@ibrae.ac.ru)

КЛЮЧЕВЫЕ СПЕЦИАЛИСТЫ

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

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

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

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

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

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

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

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

ОСНОВНЫЕ ИТОГИ 2020 ГОДА

1. Выполнен комплекс работ по численному моделированию как интегральных экспериментов, так и экспериментов по исследованию отдельных явлений с целью валидации следующих моделей программы для ЭВМ СОКРАТ-В1/В2:

- теплогидравлика первого и второго контура реакторной установки, включая работу пассивных и активных систем безопасности;
- термомеханика оболочек твэлов;
- окисление оболочек твэлов и внутрикорпусных устройств, генерация водорода;
- физико-химические взаимодействия, плавление и стекание материалов активной зоны;
- взаимодействие расплава с водным бассейном.

2. Завершена экспертиза программы для ЭВМ СОКРАТ/ВЗ в НТЦ ЯРБ. В результате взаимодействия с экспертами существенно расширена матрица верификации и согласован проект Аттестационного паспорта СОКРАТ/ВЗ. Верификационный отчет дополнен результатами валидации следующих моделей:

- выход продуктов деления из топлива (валидация на данных экспериментов с топливом UO_2 высокого выгорания, МОХ-топливом и с отжигом топлива UO_2 в воздушной среде);
- накопление актиноидов и продуктов деления в топливе (результаты исследований образцов топлива из тепловыделяющих сборок, облучавшихся в реакторах PWR и ВВЭР — база данных АЯЭ ОЭСР SF COMP0 2.0).

3. С целью научной и практической поддержки АО «Атомпроект» (г. Санкт-Петербург), использующего программу для ЭВМ СОКРАТ/ВЗ в своей деятельности по разработке и реализации проектов АЭС с ВВЭР за рубежом, выполнены работы по взаимодействию с зарубежными экспертами, представляющими Инозаказчика:

- подготовлены и переданы ответы на вопросы, поступившие в ходе экспертизы Инозаказчиком документации программы для ЭВМ СОКРАТ/ВЗ для проекта АЭС «Пакш-II» (Венгрия). Документация согласована и передана в национальный надзорный орган Венгрии в составе пакета документов, требуемых для получения лицензии на строительство АЭС «Пакш-II»;

- расширены возможности моделирования внекорпусной стадии тяжелых аварий при помощи СОКРАТ/ВЗ применительно к расчетному анализу целостности защитной оболочки и длительного удержания расплава в устройстве локализации на АЭС «Эль-Дабаа» (Египет).

4. По результатам эксплуатации программы для ЭВМ СОКРАТ-БН в АО «ОКБМ Африкантов» (г. Нижний Новгород) проведены следующие работы по модернизации моделей:

- внедрена и протестирована модель испарения летучих продуктов деления с поверхности ванны расплава, основанная на определении термодинамического равновесия химических соединений продуктов деления топлива. Данная модель является универсальной по отношению к различным РУ БН, т. к. позволяет расширить область моделирования за пределы экспериментальных условий, для которых были получены коэффициенты летучести по эмпирической модели;
- модель разрушения активной зоны дополнена моделью, учитывающей обрушение пэлов в центральную область активной зоны при разрушении чехлов ТВС. Это позволяет согласованным образом учитывать изменение реактивности при перемещении поглощающих материалов. В результате выполненных доработок повышены прогнозные возможности программы при моделировании тяжелых аварий для РУ БН.

5. Выполнены детерминистические расчеты тяжелых аварий в поддержку вероятностного анализа безопасности второго уровня для энергоблоков 1 и 3 Ростовской АЭС (заказчик АО «Атомэнергoproект»).

6. Выполнен комплекс работ в рамках международных проектов:

- в рамках проекта АЯЭ ОЭСР ARC-F выполнено исследование чувствительности результатов моделирования аварии к гипотезам о местоположении и размерах неплотностей границ контура теплоносителя, возникавших вследствие развития тяжелой аварии на энергоблоке № 1 АЭС «Фукусима Дайичи». На основании сопоставления результатов моделирования аварии при помощи программы для ЭВМ СОКРАТ/ВЗ с данными измерений на аварийном энергоблоке показаны наиболее вероятные места и время открытия течей те-

плоносителя. Полученные данные могут быть использованы для повышения реалистичности расчетов тяжелых аварий на АЭС с ВВЭР;

- в рамках проекта **АЯЭ ОЭСР ARC-F** выполнены расчеты бенчмарка, посвященного задаче взаимодействия расплава активной зоны с бетоном на **энергоблоке №1 АЭС «Фукусима Дайичи»**. Результаты, полученные с использованием программы для ЭВМ СОКРАТ/ВЗ при фиксированных начальных и граничных условиях, продемонстрировали хорошее совпадение с расчетными данными других участников бенчмарка, использовавших коды MELCOR, SAMPSON, ASTEC, AC2 и др. **Показано, что при выбранных условиях абляция бетона расплавом не прекращается в течение минимум 11 часов после разрушения корпуса реактора.**
- в рамках координационного исследовательского проекта **МАГАТЭ CRP I31033**, посвященного совершенствованию практического применения **методологий неопределенности и чувствительности** для анализа тяжелых аварий на водоохлаждаемых реакторах, в 2020 году сотрудниками ИБРАЭ выполнены референтные расчеты эксперимента QUENCH-06 и внутрикорпусной стадии тяжелой аварии «большая течь с обесточиванием энергоблока» по программе для ЭВМ СОКРАТ/ВЗ. Результаты были представлены на втором координационном совещании, которое прошло он-

лайн с 20 по 22 октября 2020. Разработанные расчетные модели будут использованы для анализа неопределенностей и чувствительности на последующих этапах проекта.

7. Совместно с ЦНТП ИБРАЭ РАН был выполнен **второй этап работ по НИОКР** «Создание системы сквозного моделирования развития аварийных процессов и параметров радиационной обстановки в СЗЗ и ЗН АЭС в случае тяжелых запроектных аварий на АЭС с выходом радиоактивных веществ в атмосферу». В рамках выполнения этапа был **разработан быстродействующий программный модуль**, предназначенный для анализа процессов внутри реактора и состояния атмосферы под защитной оболочкой АЭС при тяжелой запроектной аварии с масштабным повреждением активной зоны, а также для расчета радиоактивного выброса в окружающую среду. Проведена кросс-верификация модуля с реперными результатами расчетов по программе для ЭВМ СОКРАТ/ВЗ.

Новизна работы заключается в том, что ВПЕРВЫЕ В РОССИИ создано расчетное средство, позволяющее получать в сквозном расчете достоверный оперативный прогноз развития тяжелой аварии на АЭС с ВВЭР и параметров радиоактивного выброса в окружающую среду, учитывающий спектр неопределенностей, характеризующих как источник радиоактивных продуктов деления, так и их перенос в окружающей среде.

КЛЮЧЕВЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАБОТ

1. Numerical assessment of PARAMETER-SFI test on oxidation and melting of LWR fuel assembly under top flooding conditions, Tomashchik, Dmitry Yu., Dolganov, Kirill S., Kiselev, Arkady E., Ryzhov, Nikolay, I., Yudina, Tatiana A. // Nuclear Engineering and Design, 369 (2020).
2. Sonnenkalb M., Pellegrini M., Herranz L. E., Lind T., Morreale A. C., Kanda K., Tamaki H., Kim S., I., Cousin F., Moguel L. Fernandez Andrews N., Sevón T. Overview and outcomes of the OECD/NEA benchmark study of the accident at the Fukushima Daiichi NPS (BSAF) Phase

2-Results of severe accident analyses for Unit 1. // Nuclear Engineering and Design, 369 (2020).

3. Pellegrini M., Herranz L., Sonnenkalb M., Lind T., Maruyama Y., Gauntt R., Bixler N., Morreale A., Dolganov K., Sevón T., Jacquemain D., Journeau C., Song J. H., Nishi Y., Mizokami S. Main Findings, Remaining Uncertainties and Lessons Learned from the OECD/NEA BSAF Project. // Nuclear Technology, 2020, — Vol. 206, — No. 9, — P. 1449–1463.



РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЯДЕРНЫХ УСТАНОВКАХ

НОВОСИБИРСКИЙ ФИЛИАЛ ИБРАЭ РАН



Директор филиала
Н. А. Прибатурин
чл.-корр. РАН
(pribaturin@itp.nsc.ru)



Заведующий отделом
С. И. Лежнин
д.ф.-м.н.

КЛЮЧЕВЫЕ СПЕЦИАЛИСТЫ

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

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

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

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

ОСНОВНЫЕ ИТОГИ 2020 ГОДА

1. Совместно со специалистами **ИТ СО РАН** разработаны, отлажены и использованы для изучения **гидродинамики течения вблизи дистанционирующих решеток** (ДР) методики измерения скорости течения в межканальных и межячейстых промежутках в поперечном сечении центрального стержня — имитатора твэла и трения на поверхности центрального стержня — имитатора твэла. На стендах ИТ СО РАН с универсальным рабочим участком, представляющим собой 7- и 37-ячейстые фрагменты модели — имитатора ТВС, проведено детальное экспериментальное исследование влияния ДР на течение жидкости вблизи решеток. Выполнены детальные измерения скорости течения жидкости и трения на стенке центрального имитатора твэла до и после дистанционирующих решеток разных конструкций.

Результаты измерений указывают, что при обтекании решеток всех исследованных конструкций за ДР наблюдается неравномерное азимутальное распределение осевой скорости вокруг имитатора твэла. Зона действия этой неравномерности начинается сразу же за решеткой и распространяется вниз по течению. Такое неравномерное по азимутальному углу распределение осевой скорости жидкости обусловлено возникновением «струй» жидкости при обтекании решетки. Эти «струи» формиру-

ются внутри ячейки решетки в области между поверхностью имитатора твэла и внутренней поверхностью решетки. С увеличением расстояния от решетки происходит распад «струй» и профили скорости жидкости выравниваются (рис. 2.1.8). Подобное поведение демонстрирует измеренное напряжение трения на стенке. Наблюдаются четко выраженные «струи», распадающиеся при удалении от решетки. Детально исследовано влияние формы дистанционирующей решетки, ее высоты, толщины материала и шага ячейки на возмущения течения жидкости.

Существенные возмущения скорости течения за ДР и существенная неравномерность в распределении напряжения трения по поверхности стержня непосредственно за ДР связаны с плохим обтеканием элементов ячейки ДР, за которыми возникают интенсивные пульсации скорости жидкости, приводящие к вихреобразованию.

Выполнены анализ и обобщение результатов измерений. Получены следующие данные для верификации расчетных кодов:

- азимутальные распределения осевой скорости и напряжения трения на поверхности стенки центрального имитатора твэла при течении жидкости через 7- и 37-стержневые модели ТВС,

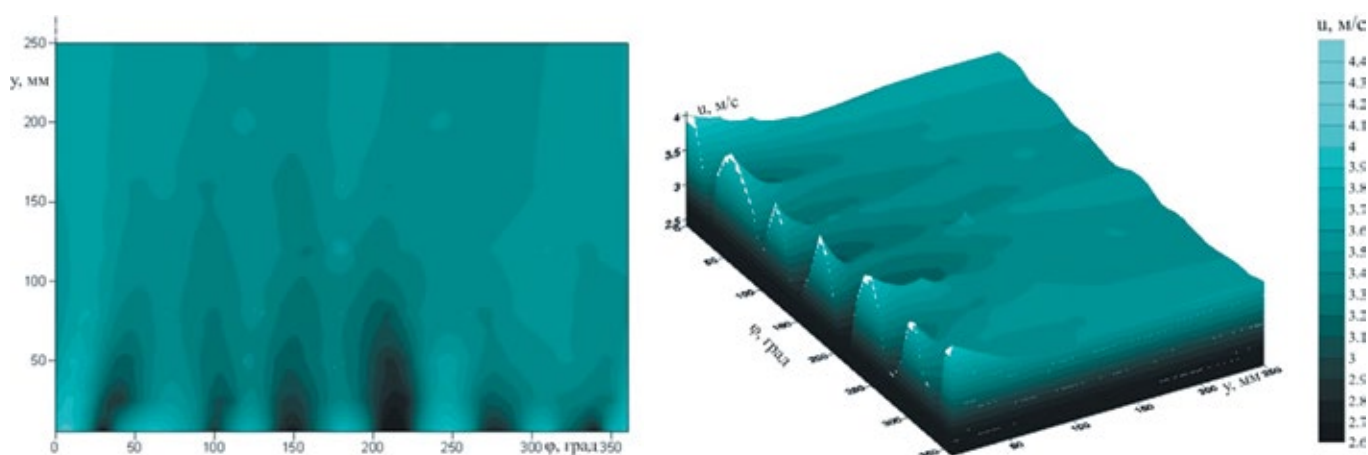


Рисунок 2.1.8 — Пример азимутального распределения осевой скорости жидкости вокруг имитатора твэла за ДР, y — расстояние от ДР вниз по потоку жидкости

- влияние относительного шага расположения стержней и их диаметра на распределение напряжения трения по периметру стержня и осевую скорость;
- влияние дистанционирующей решетки на неравномерность распределения скорости жидкости и напряжения трения на поверхности имитатора твэла;
- влияние режима течения (ламинарный, переходной, турбулентный) на распределения скоростей и напряжений трения на стенке в зависимости от расстояния после ДР.

Предложены направления оптимизации параметров сборок стержней ТВС РУ с ДР.

Проведены дополнительные **эксперименты по изучению вибрации** стержней — имитаторов твэла в потоке теплоносителя: измерены параметры вибрации имитаторов твэла в модели ТВС с дистанционирующей решеткой при течении ТЖМТ. Измерения параметров вибрации имитатора твэла проведены при течении свинцово-висмутного теплоносителя с температурой 150°C в 7-ми стержневой модели ТВС. Использование альтернативного водяного теплоносителя позволило детально изучить условия возбуждения колебаний с применением оптических систем измерения. Получены данные по зависимости амплитуды и частоты колебания имитатора твэла от скорости течения теплоносителя, длины и способа закрепления стержня — имитатора твэла.

2. Выполнены демонстрационные измерения **динамики двухфазной среды в контуре циркуляции при моделировании разрыва трубки парогенератора** и проведена их интерпрета-

ция для условий реакторной установки БРЕСТ-ОД-300, включая визуализацию течения на экспериментальной модели истечения парогазовой смеси при разрыве трубки парогенератора.

3. В рамках выполнения **проекта РНФ №18-79-10013** «Теоретико-экспериментальное исследование особенностей термического разрушения твэлов быстрого реактора с различными типами топлива» проведено расчетно-экспериментальное исследование **плавления имитатора оболочки твэла**. Эксперименты выполнялись с плавлением модельной оболочки имитатора твэла.

Проведение экспериментов сопровождалось непрерывным контролем температуры и массы имитатора твэла, а также мощности энерговыделения. Были выполнены исследования при различных мощностях энерговыделения. При этом для самой низкой мощности были проведены три измерения, чтобы определить степень повторяемости эксперимента и оценить неопределенность измерений. Мощности энерговыделения в модельных экспериментах составляли примерно 4—12% от средней энергонапряженности активной зоны реакторной установки с ТЖМТ.

В модельных экспериментах происходил нагрев оболочки имитатора твэла до температуры плавления, плавление оболочки и ее стекание вниз под действием силы тяжести. Пример зависимости температуры оболочки и уноса массы оболочки от времени показан на рис. 2.1.9, на котором приведены результаты соответствующих расчетов.

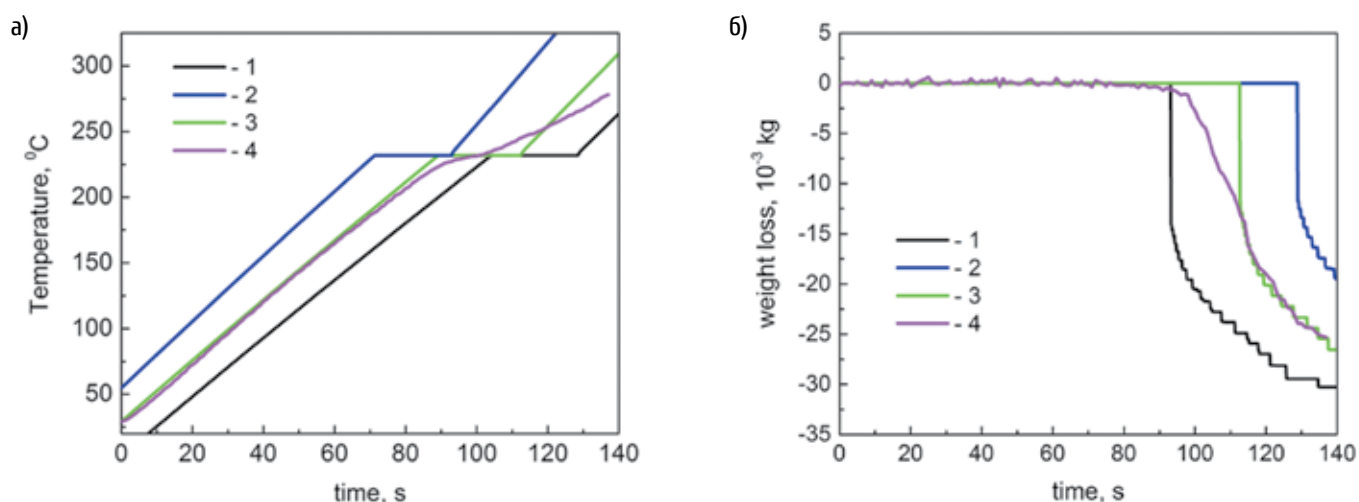


Рисунок 2.1.9 — Сравнение экспериментальных и расчетных данных по изменению температуры (а) и скорости потери массы б): 1 — минимальное расчетное значение, 2 — максимальное расчетное значение, 3 — номинальное расчетное значение, 4 — эксперимент

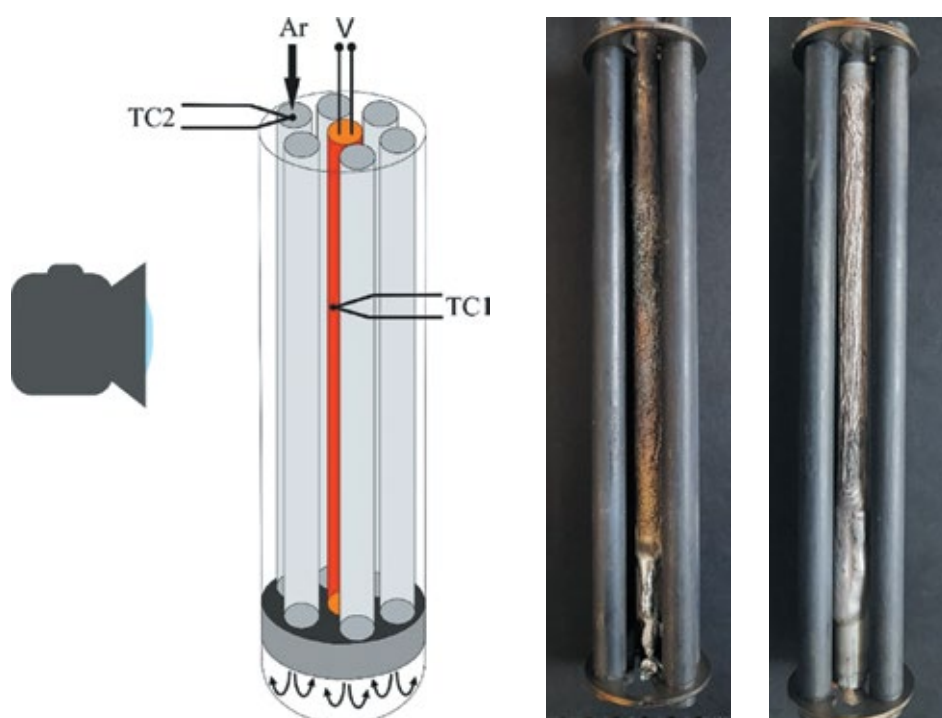


Рисунок 2.1.10 — Схема эксперимента и фотографии расплава оболочки. Материал оболочки — цинк (слева), алюминий (справа). Видны область плавления и характерная форма движения расплава

4. Проведены модельные экспериментальные исследования по **динамике плавления оболочки имитатора твэла** в геометрии, соответствующей семитвэльному участку тепловыделяющей сборки (рис. 2.1.10). Экспериментальный стенд представлял собой модельную семитвэльную сборку, помещенную в кварцевую колбу с внутренним диаметром 47 мм. Диаметр имитаторов твэлов был равен 12 мм, толщина стенки имитатора 1 мм. Проведена визуализация плавления оболочки имитатора твэла, которая продемонстрировала формирование ручейкового режима течения расплава оболочки. При достижении расплавом оболочки дистанционирующей решетки и касании периферийных имитаторов твэла происходит застывание расплава.

5. Выполнены доработка матрицы верификации и разработка системы аналитических тестов для верификации моделей отдельных процессов, сопровождающих разрушение а.з. с учетом пространственных эффектов в составе интегрального кода **ЕВКЛИД/V2**. Были рассмотрены аналитические тесты по движению натриевого теплоносителя в сборке стержней, движению расплава оксидного топлива и компонентов СНУП топлива в свинцовом теплоносителе.

Была проведена работа по анализу существующих экспериментальных данных, пригодных для верификации интегрального кода **ЕВКЛИД/**

V2 в части явлений, сопровождающих тяжелые аварии с разрушением а.з.

На основе анализа были выбраны эксперименты, в рамках которых имитировались проектные и запроектные аварии в сборках с жидкометаллическим теплоносителем: авария с частичной и полной мгновенной блокировкой проходного сечения (TIB), авария с потерей системного и надежного электроснабжения с отказом всех средств воздействия на реактивность (ULOF), авария с непредусмотренным последовательным извлечением из активной зоны стержней СУЗ вследствие отработки ложного сигнала с отказом всех средств воздействия на реактивность (UTOP). К первому типу аварий относятся эксперименты по имитации аварии с частичной блокировкой проходного сечения в 169-стержневой сборке (KNS 169) и имитации аварии с полной блокировкой проходного сечения в 37-стержневой сборке (SCARBEE-N BE+3). Ко второму — имитация аварии типа ULOF в 37-стержневой сборке (KNS 37). Некоторые результаты расчетов приведены на рисунке 2.1.11.

При моделировании указанных экспериментов с использованием кода **ЕВКЛИД/V2** учитывалось изменение параметров по сечению и высоте сборок в процессе имитации аварий. В результате расчетов было получено пространственное распределение параметров

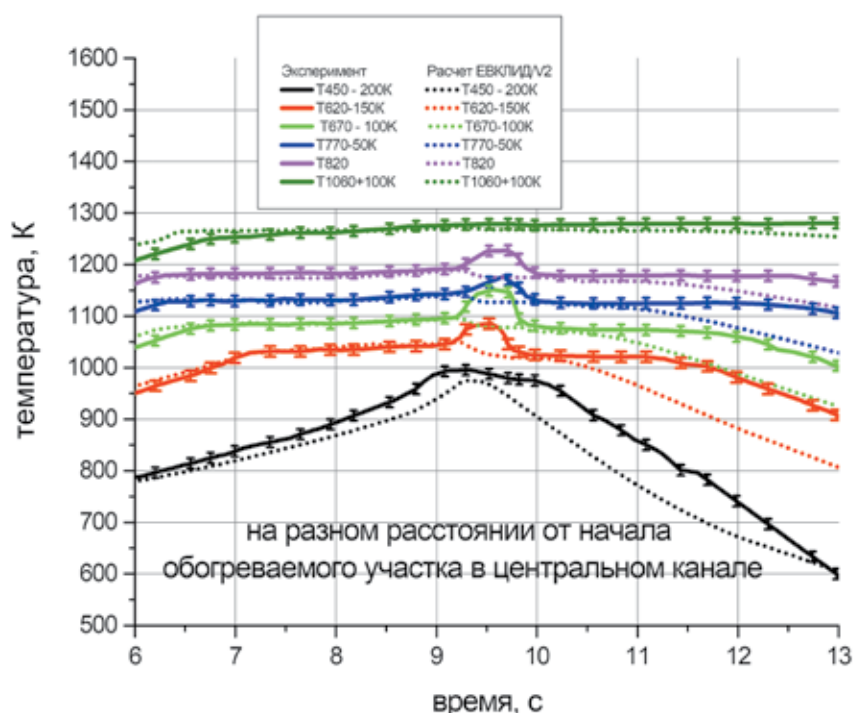


Рисунок 2.1.11 — Зависимость температуры оболочки центрального ТВЭЛ от времени на центральном стержне на расстояниях 450, 620, 670, 770, 820 и 1060 мм от начала обогреваемой части

(температуры, скорости, давления, распределения материалов). Была проведена оценка погрешности расчета отдельных параметров, измеренных в эксперименте: температура теплоносителя — 28 К, максимальная темпе-

ратура оболочки ТВЭЛ — 66 К, давление в теплоносителе — 10%, объем пара натрия — 60%.

КЛЮЧЕВЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАБОТ

1. Большов Л. А., Прибатурин Н. А., Кашинский О. Н., Лобанов П. Д., Курдюмов А. С. Экспериментальное исследование смешения потоков жидкости с различной температурой в тройниковом соединении // Прикладная механика и техническая физика. 2020. — Т. 61. — № 3 (361). — С. 63–73.
2. Прибатурин Н. А., Лобанов П. Д., Рандин В. В., Кашинский О. Н., Воробьев М. А., Волков С. М. Экспериментальное исследование напряжения трения при течении жидкости в модели ТВС // Теплофизика и аэромеханика, № 6, 2020.
3. Усов Э. В., Климонов И. А., Бутов А. А. Численное исследование движения расплава топлива различного типа в ТВЭЛ // Теплоэнергетика. 2020. — № 2. — С. 54–61.
4. Zhdanov V. S., Klimonov I. A., Lezhnin S. I., Lobanov P. D., Pribaturin N. A., Svetonosov A. I., Usov E. V. Computation-and-Experiment Study of Behavior of Molten Metal in Fuel Element and Fuel Assembly: Preliminary Experiments and Computational Models // Journal of Engineering Thermophysics. 2020. — Vol. 29. — No. 2. — P. 209–221.
5. Lobanov P. D., Zhdanov V. S., Usov E. V., Svetonosov A. I., Klimonov I. A. Experimental and numerical determination of the rate of mass loss and temperature evolution of the single fuel rod cladding imitator during its melting // Nuclear Engineering and Design. 2020. — V. 363. — P. 110681.
6. Лобанов П. Д., Усов Э. В., Светоносков А. И., Лежнин С. И. Анализ экспериментальных данных по плавлению и движению расплава металла по цилиндрической поверхности // Теплофизика и Аэромеханика. 2020. — Том 27. — № 3. — С. 483–490.



ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ УПРАВЛЕНИЯ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ



**НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ
НАПРАВЛЕНИЯ**

Заместитель директора

В. Н. Пономарев

д.ф-м.н.

(ponomarev@ibrae.ac.ru)



Заведующий отделом

С. В. Сумароков

(sumarokov@ibrae.ac.ru)

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

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

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

ОСНОВНЫЕ ИТОГИ 2020 ГОДА

1. Система «УРАНИЯ»

В рамках проектного направления «Прорыв» разработан **релиз 1.0 системы «УРАНИЯ»**. Система управления данными и процессами расчетных и экспериментальных научных исследований «УРАНИЯ» предназначена для автоматизации проведения расчетных и экспериментальных исследований и ориентирована на непрерывный контроль соблюдения требований, многовариантный анализ изделий и коллективную работу (рис. 2.1.12).

Ключевыми функциями релиза 1.0 системы «УРАНИЯ» являются:

- загрузка требований из системы управления требованиями (СУТ) и отслеживание их изменений;
- формирование структуры данных, относящихся к расчетам (исходные данные, расчетные модели, расчетные случаи, связь с требованиями);
- планирование и управление задачами в рамках проведения расчетов и экспериментов;
- регистрация вычислительных ресурсов в системе «УРАНИЯ»;
- подключение решателей к системе «УРАНИЯ» для автоматизации проведения расчетов;
- управление вычислениями с использованием подключенных решателей, включая проведение связанных расчетов;
- оценка текущих результатов расчетов в онлайн-режиме (актуально для длительных расчетов);
- автоматизированное извлечение и сохранение в системе ключевых результатов расчетов и построение отчетов по ним;
- оценка соответствия полученных результатов расчетов и экспериментов целевым значениям требований;
- визуализация «дерева» проведенных вариантов расчетов для формирования стратегии дальнейших исследований;
- сбор, хранение и отслеживание данных об экспериментах.

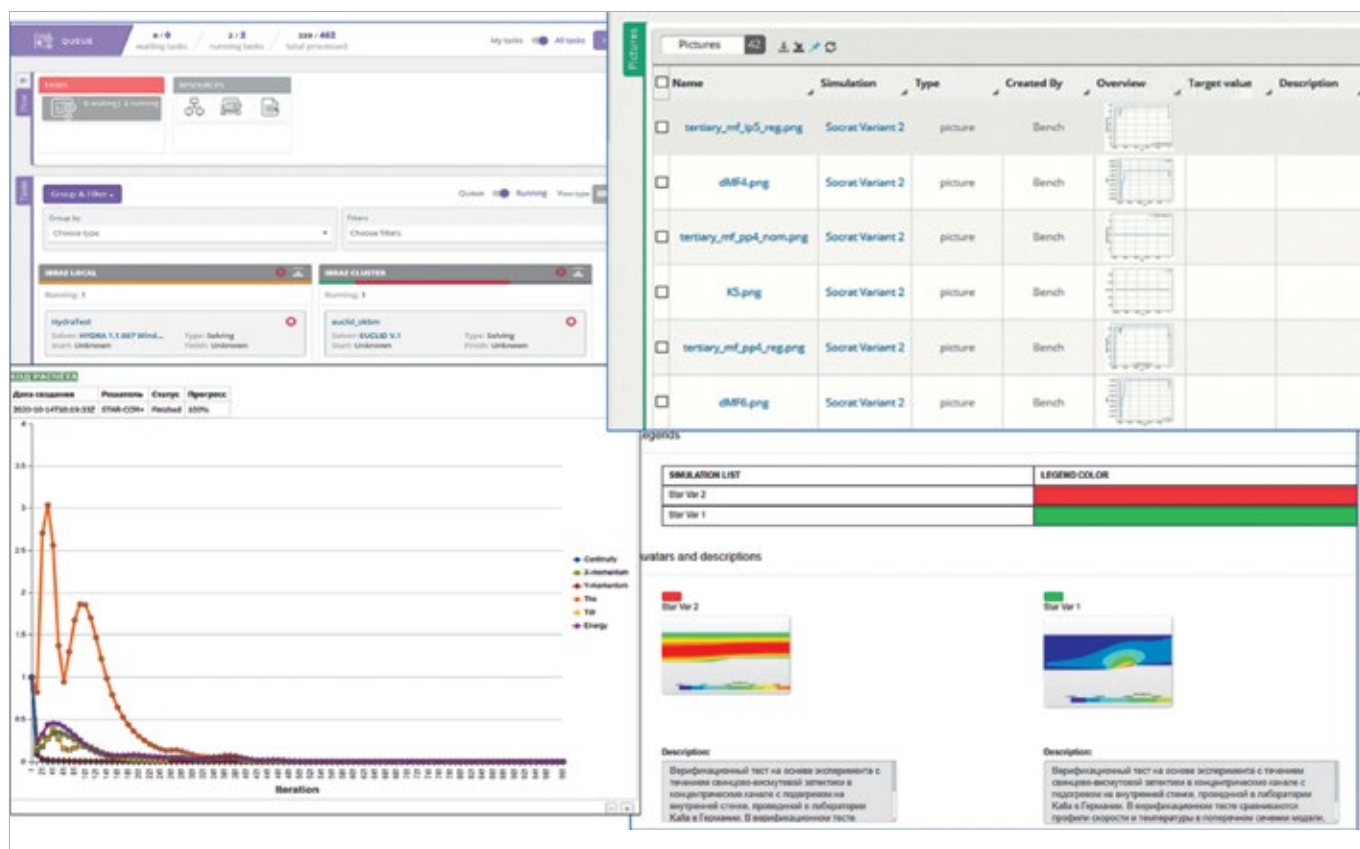


Рисунок 2.1.12 – Примеры интерфейсов системы «УРАНИЯ»

2. Расчетные комплексы для решения оптимизационных задач и параметрических исследований

В рамках ПН «Прорыв» в 2020 году были разработаны и испытаны **макеты расчетных комплексов для решения оптимизационных задач** (РКО). Разрабатываемые РКО построены на базе специализированной программной платформы посредством ее адаптации к соответствующей предметной области и подключения к ней через соответствующие программные интерфейсы расчетных кодов и пре-постпроцессоров. Программная платформа обеспечивает автоматический или автоматизированный поиск оптимальных решений в соответствии с заданной исследователем постановкой.

Разработан макет расчетного комплекса для **решения оптимизационных задач теплогидравлики** (РКО ТГ), включающий интерфейсы с кодами HYDRA-IBRAE/LM/V1, CONV-3D и STAR-CCM+. Проведены испытания макета РКО ТГ, в рамках которых были найдены решения для нескольких постановок задач.

Одна из таких постановок — поиск геометрических параметров дросселя, расположенного на входе в парогенерирующую трубу и предназна-

ченного **для повышения устойчивости работы ПГ РУ БРЕСТ-ОД-300** в переходных режимах работы (расчетная модель реализована в коде HYDRA-IBRAE/LM/V1). В результате проведенного оптимизационного исследования были сформированы и рассчитаны 44 конфигурации дросселя парогенерирующей трубы, две из которых макетом РКО ТГ определены как оптимальные, поскольку обеспечивают минимальный массовый расход воды. **В рамках проведенного исследования удалось снизить расход (относительно начальной конфигурации) на 66,5%** (рис. 2.1.13).

Разработан макет расчетного комплекса для решения задач **оптимизации режимов эксплуатации РУ** (РКО РЭ), включающий интерфейс с программным комплексом (ПК) **SimInTech**. РКО РЭ будет применяться для исследования переходных режимов работы второго контура РУ в рамках интегральной расчетной математической модели БРЕСТ-ОД-300 и для поиска оптимальных настроек регуляторов с точки зрения увеличения энерговыработки.

Разработан макет расчетного комплекса для **решения задач оптимизации нагрузок на трубопроводные системы** (РКО ТС), предназначенный для поддержки выполняемых в ПК

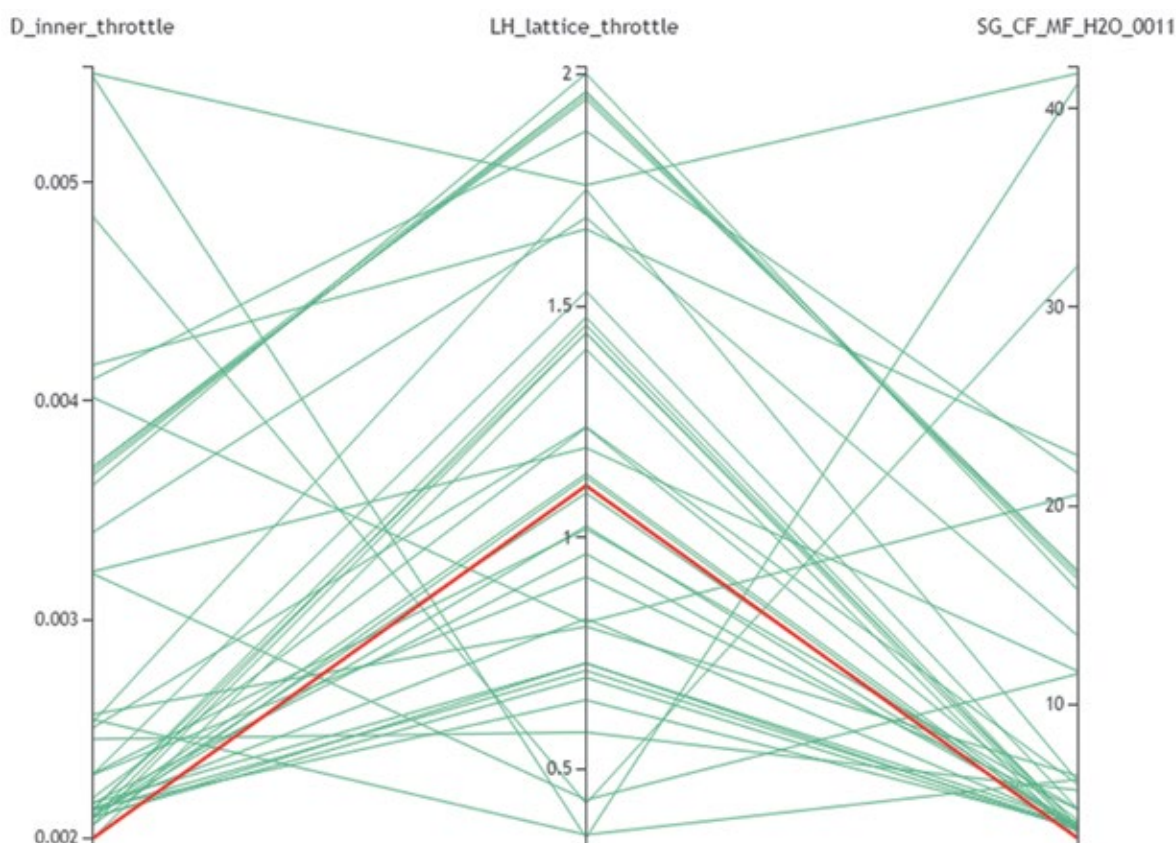


Рисунок 2.1.13 — Зависимость двух варьируемых и целевого (справа) параметров расчета

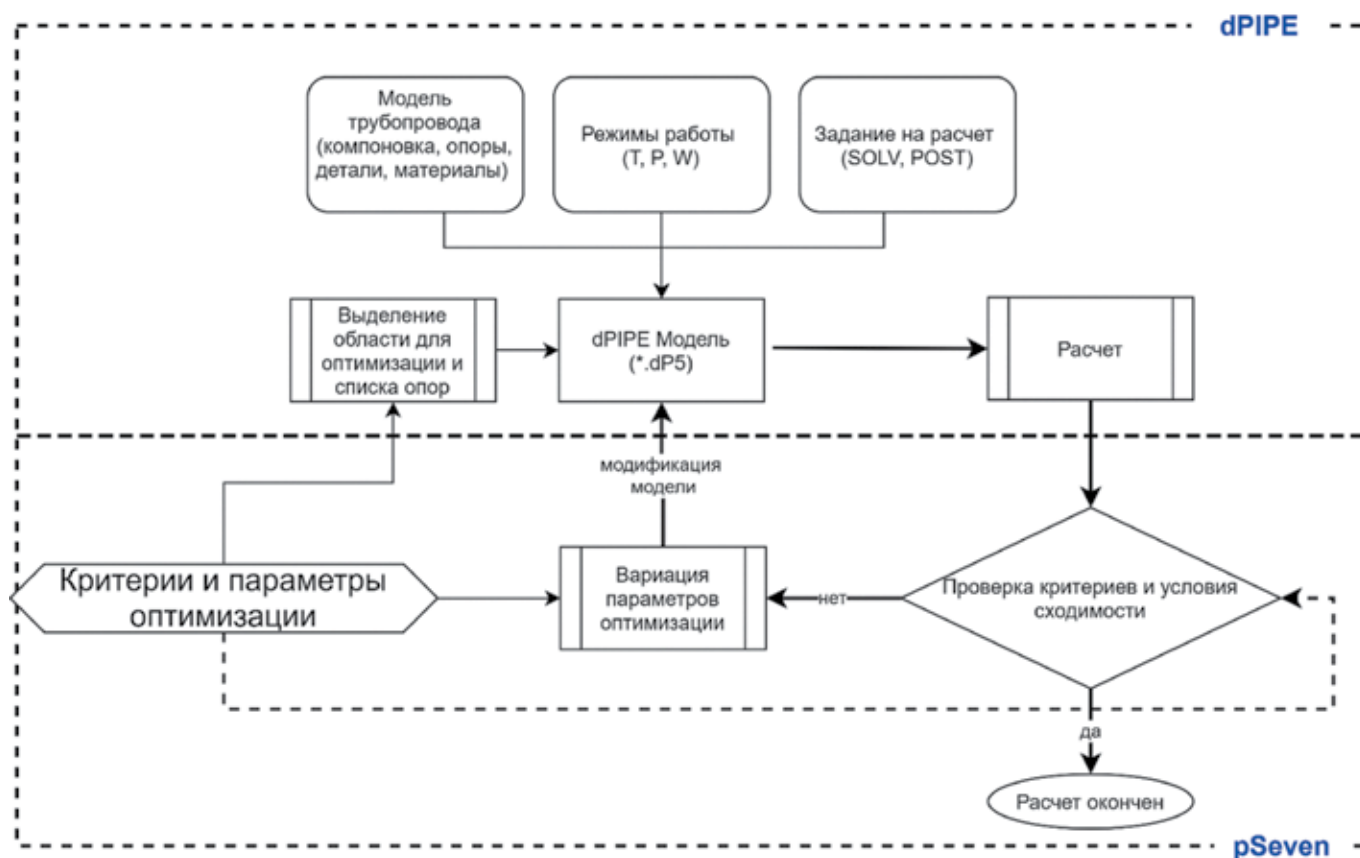


Рисунок 2.1.14 – Блок-схема макета РК0 ТС

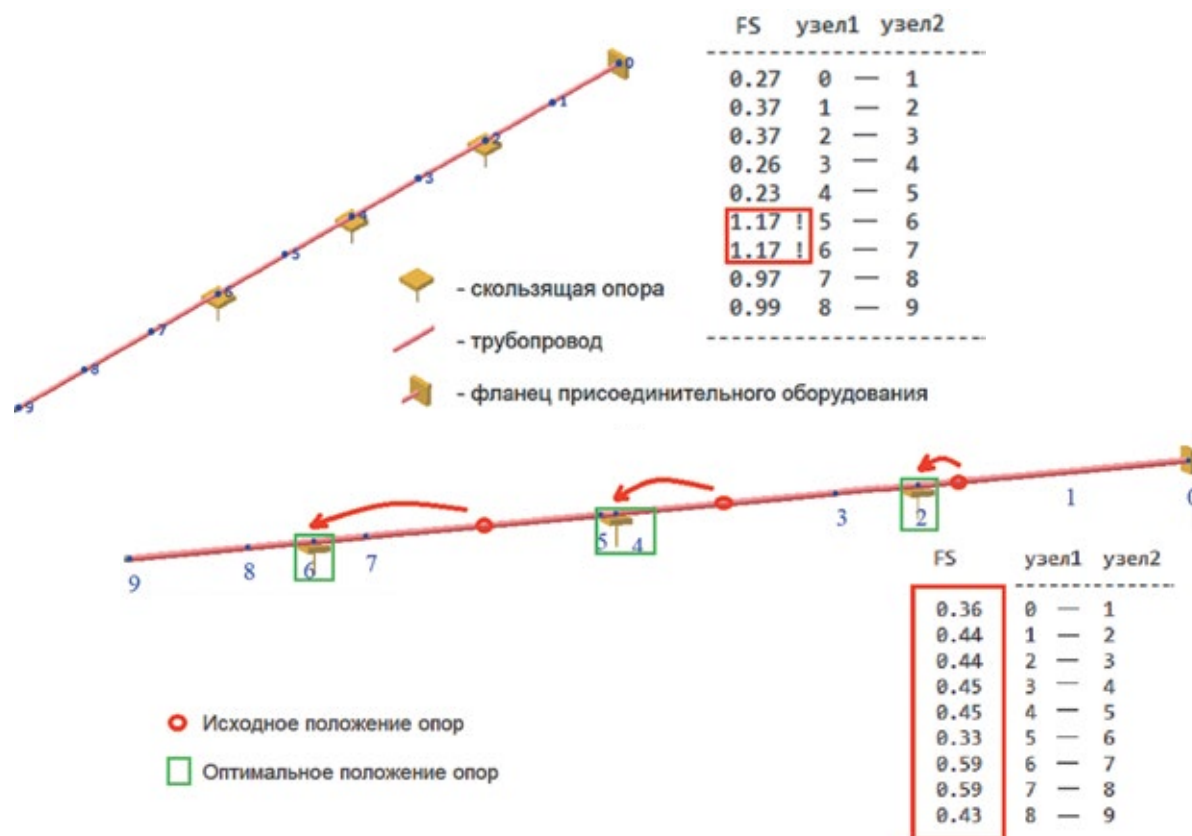


Рисунок 2.1.15 – Исходная (сверху) и удовлетворяющая нормам по нагрузке (снизу) конфигурации опорно-подвесной системы участка трубопровода

dPIPE 5 расчетов на прочность трубопроводов АЭС при действии эксплуатационных и сейсмических нагрузок в соответствии с нормами (рис. 2.1.14).

Апробация макета проведена на примере решения нескольких типов задач по оптимизации опорно-подвижной системы трубопроводов (рис. 2.1.15):

- минимизация нагрузок на присоединительный фланец оборудования;
- увеличение запаса прочности трубопровода (снижение напряжений);
- снижение общей (эквивалентной) стоимости опорно-подвижной системы;
- расстановка опор из «начального» (сгруппированных в одной области) положения.

3. Препроцессор кода СОКРАТ-БН/В2

В состав расчетного кода СОКРАТ-БН/В2 входят несколько расчетных модулей, моделирующих различные процессы и системы реакторной установки и выход продуктов деления за ее пределы. В основном наборе модулей, отвечающих за моделирование процессов в РУ, используется единый входной файл с описанием параметров расчетов. До недавнего времени, в связи с отсутствием графических средств препроцессинга, пользователи вынуждены были формировать такой входной файл в текстовых редакторах на основании технической документации РК. В 2020 году был **разработан препроцессор**, первой версии которого достаточно для подготовки всех входных данных, участвующих в моделировании контура РУ. Графический интерфейс препроцессора представлен на рис. 2.1.16.

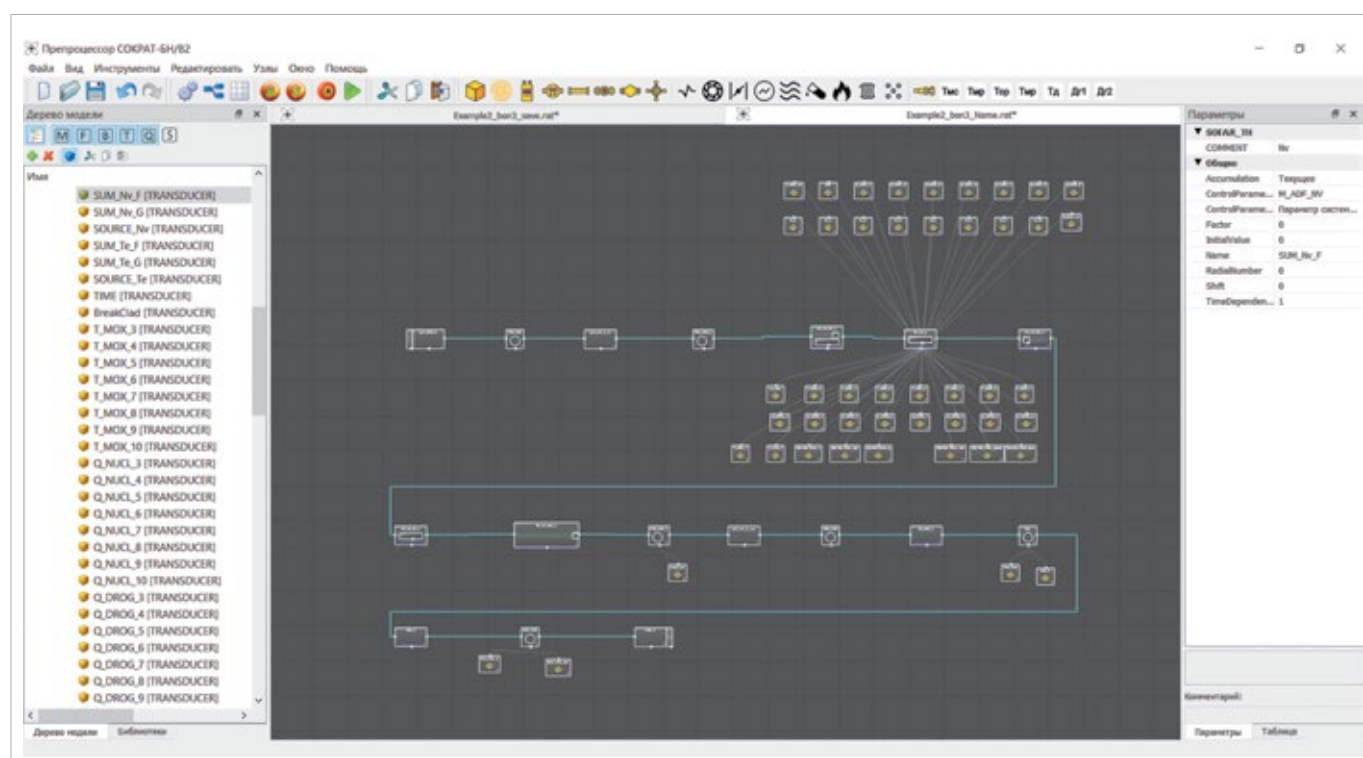


Рисунок 2.1.16 — Интерфейс препроцессора СОКРАТ-БН/В2

КЛЮЧЕВЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАБОТ

1. Сумароков С. В., Гусев М. В., Кечков А. А., Новосельский Ф. О. Концепция и реализация макета системы управления данными и процессами расчетных и экспериментальных научных исследований // Информационные технологии в проектировании и производстве, 2020. — № 1 (177). — С. 3–7.

2. Сумароков С. В., Жабоев Т. К., Новосельский Ф. О., Гусев М. В., Королев С. А. Определение и апробация требований к расчетным комплексам для решения оптимизационных задач проектного направления «Прорыв» // Информационные технологии в проектировании и производстве, 2020. — № 2 (178). — С. 31–36.

2.2. БЕЗОПАСНОСТЬ ЗАВЕРШАЮЩИХ СТАДИЙ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ОБЪЕКТОВ ЯДЕРНОЙ ТЕХНИКИ



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



НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ
НАПРАВЛЕНИЯ

Заместитель директора

И. И. Линге

д.т.н.
(linge@ibrae.ac.ru)



Заведующий отделением

С. С. Уткин

д.т.н.
(uss@ibrae.ac.ru)

КЛЮЧЕВЫЕ СПЕЦИАЛИСТЫ

В. С. Гупало, д.т.н.; **Б. Т. Кочкин**, д.г.-м.н.; **О. А. Морозов**, к.г.-м.н.; **В. Г. Тесля**, к.т.н.; **Д. А. Озерский**, к.т.н.; **К. С. Казаков**, **Е. В. Муленкова** — геологические и гидрогеологические аспекты безопасности;

И. В. Капырин, к.ф.-м.н.; **А. В. Расторгуев**, к.т.н.; **В. К. Крамаренко**, к.ф.-м.н.; **К. А. Болдырев**, к.т.н. — геомиграционное и геохимическое моделирование;

А. С. Баринов, к.т.н.; **М. В. Ведерникова**, к.т.н.; **С. А. Богатов**, к.ф.-м.н.; **Д. В. Крючков**, к.т.н. — прикладные проблемы безопасности ЗСЖЦ;

Е. А. Савельева, к.ф.-м.н.; **В. С. Свительман**, к.ф.-м.н. — анализ неопределенностей и управление информацией;

С. В. Панченко, **А. Н. Скоробогатов**, **И. Л. Абалкина**, к.э.н.; **Е. М. Мелихова**, к.ф.-м.н.;

А. А. Аракелян — проблемы радиоэкологии и реабилитации;

П. А. Блохин, к.т.н.; **А. И. Блохин**, к.ф.-м.н.; **Ю. Е. Ванеев**, д.т.н. — радиационные характеристики объектов ЯТЦ;

Ключевые молодые специалисты: В. В. Сушкин, Г. Д. Неуважаев, Ф. В. Григорьев, М. Ю. Ширнин, Д. В. Ануприенко, К. Д. Смирнов, Т. А. Александрова, М. М. Горелов, Д. К. Валетов, П. Д. Блинов, А. А. Рукавичникова, С. Т. Казиева, П. А. Кизуб.

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

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

ОСНОВНЫЕ ИТОГИ 2020 ГОДА

1. Безопасность геологического захоронения РАО

Несмотря на сложности, связанные с санитарно-эпидемиологической обстановкой, в 2020 году было **положено начало полномасштабному научному сопровождению сооружения ПИЛ и ПГЗРО**:

- состоялось **официальное утверждение** положения о научном руководителе работ;
- произошло резкое **увеличение объема фактографического материала** по материалам исследований участка «Енисейский» (геофизическая и маршрутная съемка, геодинамические наблюдения за современными движениями земной коры, гидрогеологические наблюдения, новое прочтение кернового материала и т.д., см. рис. 2.2.1—2.2.3) и такое же большое увеличение объемов нового аналитического материала вследствие получения отчетности от 10 организаций-соисполнителей по контрактам, заключенным в конце 2019 — начале 2020 гг. (среди них — Красноярскгеология, Ленметрогипротранс, Сколтех, ИГЭ РАН, ИФХЭ РАН, ИГЕМ РАН, Геофизический центр РАН);

- выполнялся рутинный **годовой этап цикла длительных наблюдений** за процессами, явлениями и факторами, которые могут повлиять на долговременную безопасность объекта (горизонтальные и вертикальные движения земной коры, сейсмическая активность, наблюдения за поверхностными водами, метеорология и т. д.);
- прорабатываются организационные вопросы создания **Красноярского филиала ИБРАЭ РАН**, основной задачей которого является логистическая поддержка участников проекта, в том числе: прием, предварительная обработка проб; хранение оборудования и инструментов; взаимодействие с филиалом ФГУП «НО РАО» и иными организациями, выполняющими работы на площадке строительства ПИЛ;
- подготовлен **проект монографии** в обоснование выбора участка «Енисейский». В книге объемом более 400 страниц, к подготовке которой были привлечены участники соответствующих работ (около 20 человек), впервые систематизированы все аргументы, которые, так или иначе, становились частью обоснования решений по площадке;



Рисунок 2.2.1 — Определение компонентов химического состава и свойств воды в рамках комплексных геофизических и геохимических исследований в направлении наиболее вероятной разгрузки подземных вод из зоны ПГЗРО



Рисунок 2.2.2 — Подготовка к проведению обследования при-скважинных зон массива в существующих глубоких скважинах и панорамное изображение участка массива. Результаты исследований были проинтерпретированы с применением полуавтоматических алгоритмов, позволяющих определить параметры трещиноватости массива — направление, раскрытие, углы падения и простираия трещин. Данная информация будет использована для уточнения геолого-структурной модели массива



Рисунок 2.2.3 — Пример обследованного выхода коренных горных пород. Был выполнен отбор ориентированных образцов, проведено детальное изучение трещиноватости, а также изучение петрофизических свойств пород в камеральных условиях

- основные объемы новой информации включаются в **базу знаний PULSE**, а работы по развитию проекта ПИЛ осуществляются в системе **BIM-моделирования**;
- большой массив новых результатов **не дал оснований к пересмотру** разработанной в период 2016—2018 гг. комплексной программы исследований, что исключает сомнения в фундаментальном характере её подготовки.

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

Продолжается **развитие системы расчетно-прогностических комплексов** (РПК) для решения вопросов обоснования безопасности объектов ЯТЦ, в том числе на этапах их вывода из эксплуатации:

- в ближайшее время готовится к аттестации **РПК КОРИДА**, предназначенный для прогнозирования радиационных характеристик ОЯТ и РАО. В него интегрированы новые модули оценки дозовых нагрузок на население и расчета нормативов допустимых сбросов радиоактивных веществ в водные объекты. Подготовлен верификационный отчет для аттестации;
- на финишной прямой процедура аттестации **РПК GeRa/V2**, предназначенного для моделирования переноса радионуклидов в различных геологических средах: проведена экспертиза обосновывающих материалов, осуществляется работа по устранению замечаний. Аттестовать код планируется в течение года;
- в рамках работ по **РПК MOUSE** были разработаны рекомендации по оценке неопределенностей результатов расчетного моделирования и анализу чувствительности модели к ее параметрам. Потребность в таком методическом обеспечении практических работ по обоснованию безопасности возникла в силу того, что необходимость сопровождения расчетов анализом неопределенностей заложена как в российских, так и международных требованиях и рекомендациях в области оценки долговременной безопасности ОИАЭ, но конкретные методические аспекты ранее были проработаны только в рамках обоснования безопасности атомных станций;
- продолжается работа по созданию **комплексных моделей эволюции материалов инженерных барьеров безопасности**, включая практически значимые приложения для си-

туаций, в которых принципиально важна роль учета кинетики химических взаимодействий: например, при моделировании процессов самоочищения промышленных водоемов путем внесения биогенных добавок, оценке условий создания химического барьера в донных отложениях;

- система расчетно-прогностических комплексов была дополнена **инструментарием по управлению информацией**: разработаны и наполняются база исходных данных для численных моделей, а также база данных по использованным методам и решенным задачам для каждого из расчетных комплексов.

В течение ближайших трех лет **все РПК должны пройти аттестацию** и в дальнейшем могут войти в пул расчетных средств в рамках единой цифровой стратегии Госкорпорации «Росатом».

Предметно разрабатываемый в течение последних 5 лет расчетный инструментарий применялся в 2020 г.:

- **при создании и совершенствовании моделей объектов ФГУП «РАДОН», АО «СХК», АО «АЭХК», ФГУП «ГХК»** в рамках обоснования безопасности и оптимизации технических решений по ВЭ (подробнее см. в п.3 следующего раздела настоящего Отчета на 44 стр.);
- **для решения новых задач** по эксплуатационной и долговременной безопасности бассейна выдержки Белоярской АЭС, возможности использования Теченского каскада водоемов ФГУП «ПО «Маяк» для нужд промышленного энергетического водоснабжения;
- **в работах по перспективным технологиям** переработки ОЯТ и фракционирования РАО, систематизации данных о РАО 1 и 2 класса на основе ретроспективного анализа.

В 2020 г. продолжались многолетние работы по **анализу радиационной и экологической обстановки** в районах расположения объектов атомной отрасли (в отчетном году — ПАО «НЗХК» и ФГУП «РФЯЦ – ВНИИТФ им. акад. Е.И. Забабахина») на основе методов сравнительной оценки радиационных и химических рисков.

Итоги этих исследований демонстрируют радиоэкологическую безопасность современной деятельности рассмотренных ОИАЭ (рис. 2.2.4).

Оценки существующих радиационных рисков проводились также на участке строительства **Юго-Восточной хорды** (Москва). По этому проекту издан обстоятельный препринт — <http://www.ibrae.ac.ru/pubtext/333/>.

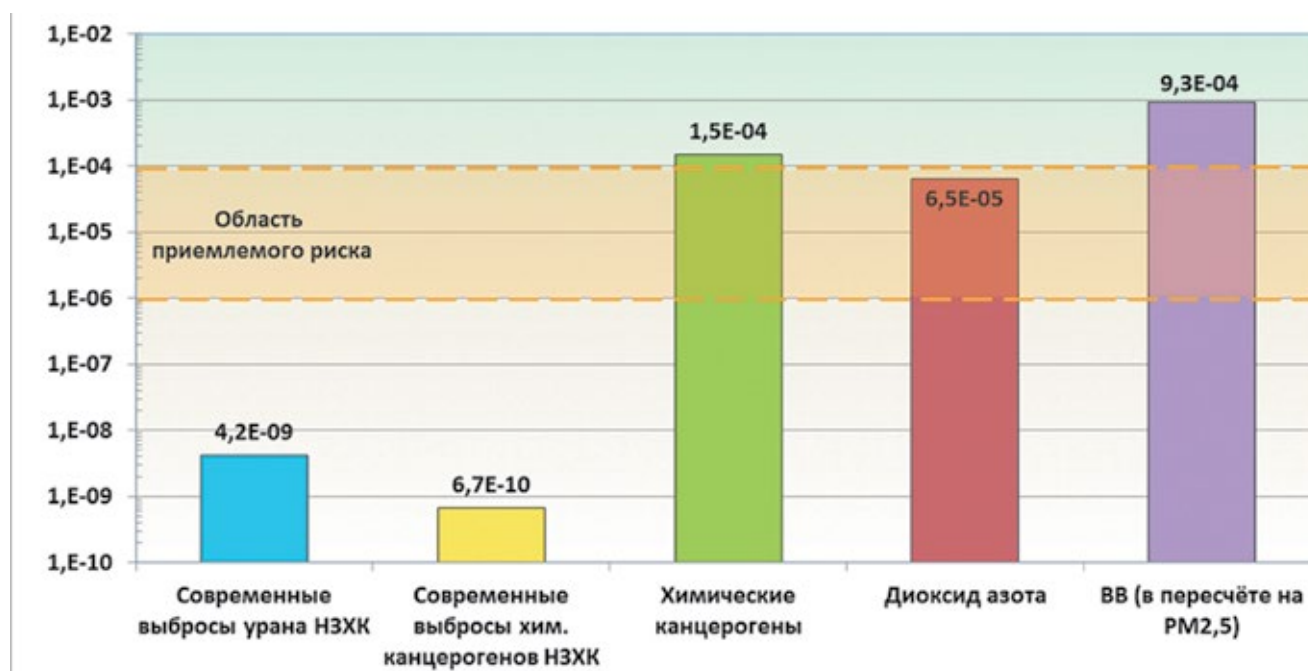


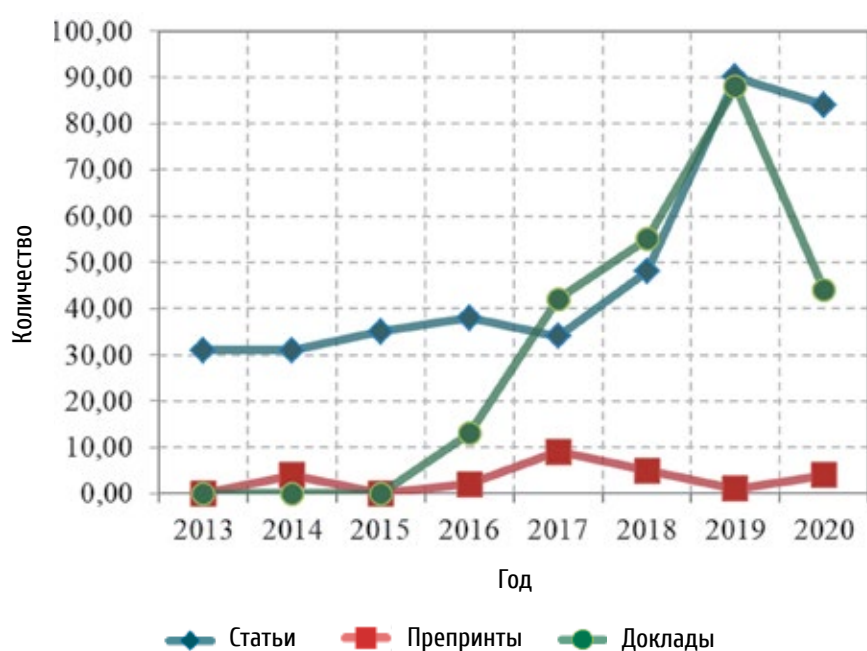
Рисунок 2.2.4 — Сравнение рисков потенциального воздействия различных техногенных факторов на здоровье населения Новосибирска (2017–2019 гг.)

По направлениям деятельности отделения продолжается **активное международное сотрудничество**. В силу эпидемиологической ситуации все мероприятия, начиная с апреля 2020 г., проводились **в режиме видеоконференц-связи**. С. С. Уткин, А. Ю. Иванов, Е. А. Савельева, П. А. Блохин, В. С. Свительман, В. И. Шпиньков в качестве российских экспертов приняли участие в заседаниях профильных комитетов и рабочих групп АЯЭ/ОЭСР и МАГАТЭ по тематике

обращения с РАО и ОЯТ, в том числе по вопросам создания ПГЗРО, безопасности объектов ЯТЦ, управления знаниями, обращения с РВ и РАО природного происхождения, ВАБ.

Публикационная активность

В 2020 году, учитывая особенности организационной и трудовой деятельности, удалось сохранить **высокую публикационную активность** (рис. 2.2.5).



Получено **10**
свидетельств о
государственной
регистрации РИД в
системе Роспатента

Рисунок 2.2.5 — Динамика публикационной активности за 2013–2020 гг.

КЛЮЧЕВЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАБОТ

1. Гупало В. С., Казаков К. С., Коновалов В. Ю., Демин А. В. О синхронизации мероприятий программы исследований массива с проходческими работами при создании подземной исследовательской лаборатории в Нижнеканском массиве // Горный журнал. — 2020. — № 3. — С. 72–78.
2. Bol'shov L. A., Linge I. I. Strategy for the Development of Nuclear Energy in Russia and Environmental Matters // Atomic Energy. — 2020. — Vol. 127. — № 6. — P. 333–338.
3. Кочкин Б. Т., Уткин С. С., Савельева Е. А., Богатов С. А., Баринев А. С. Эволюция геосферы на территории размещения ПГЗРО в Нижнеканском массиве // Радиоактивные отходы. — 2020. — № 1 (10). — С. 56–65.
4. Сускин В. В., Уткин С. С., Коновалов В. Ю., Понизов А. В. Применение эмпирического и расчетного методов при оценке возможных нарушений нормальной эксплуатации на объектах захоронения жидких РАО // Радиоактивные отходы. — 2020. — № 1 (10). — С. 22–34.
5. Линге И. И., Уткин С. С., Свительман В. С., Дерябин С. А. Расчетное обоснование долговременной безопасности и оптимизация решений по захоронению РАО и выводу из эксплуатации: тенденции, потребности, возможности // Радиоактивные отходы. — 2020. — № 2(11). — С. 85–98.
6. Уткин С. С., Дорофеев А. Н., Дорогов В. И. Захоронение РАО в России: анализ ключевых проблем обеспечения безопасности и форсирование их решения на научно-технических советах Госкорпорации «Росатом» // Радиоактивные отходы. — 2020. — № 2(11). — С. 36–55.
7. Богатов С. А., Крючков Д. В., Павлов Д. И., Сыченко Д. В. Анализ различных концепций захоронения РАО класса I в кристаллических породах // Радиоактивные отходы. — 2020. — № 3 (12). — С. 66–77.
8. Гупало В. С., Казаков К. С., Неуважаев Г. Д., Озерский Д. А. (ИБРАЭ РАН), Коновалов В. Ю. (ФГУП «НО РАО»). Анализ подходов к консервации и ликвидации скважин на участке недр «Енисейский» (Красноярский край, Нижнеканский массив) // Радиоактивные отходы. — 2020. — № 4 (13). — С. 30–41.
9. Блохин А. И., Блохин П. А., Казиева С. Т. Применение расчетного кода TRACT для оценок радионуклидных составов и радиационных характеристик ОЯТ и РАО класса I // Радиоактивные отходы. — 2020. — № 4 (13). — С. 99–111.
10. Novikov K., Kapurin I. Coupled Surface–Subsurface Flow Modelling Using the GeRa Software // Lobachevskii Journal of Mathematics. — 2020. — Vol. 41. — № 4. — P. 538–551.
11. Валетов Д. К., Неуважаев Г. Д., Свительман В. С. Разработка геофильтрационной модели для участка «Енисейский» и оптимизация ее параметров при помощи гибридного оптимизационного алгоритма // Известия Российской академии наук. Энергетика. — 2020. — № 1. — С. 128–137.



ИНФОРМАЦИОННАЯ ПОДДЕРЖКА РАЗРАБОТКИ И РЕАЛИЗАЦИИ ПРОГРАММ В СФЕРЕ ЯРБ



**НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ
НАПРАВЛЕНИЯ**

Заместитель директора

И. И. Линге

д.т.н.
(linge@ibrae.ac.ru)



Заведующий отделением

А. Ю. Иванов

(aivanov@ibrae.ac.ru)

КЛЮЧЕВЫЕ СПЕЦИАЛИСТЫ

В. И. Дорогов, к.ф.-м.н. — комплексная экспертиза проектов в сфере ЯРБ;

И. Л. Абалкина, к.э.н. — социально-экономические аспекты ЗСЖЦ;

Е. М. Мелихова, к.ф.-м.н. — особенности коммуникации и восприятия в вопросах атомной энергетики;

А. А. Самойлов, к.т.н. — комплексное планирование работ по ВЭ и обращению с РАО;

В. В. Дроздов — мониторинг эффективности реализации мероприятий программ в сфере обеспечения ЯРБ;

Д. Ф. Ильясов, к.э.н. — экономический анализ проблем ЗСЖЦ;

А. В. Приходько — комплексные вопросы лицензирования в сфере ЯРБ;

О. А. Супатаева, к.ю.н. — нормативно-правовое регулирование в сфере ЗСЖЦ;

А. А. Федьков — создание IT-инфраструктуры;

Ин. И. Линге — создание комплексной методологии цифровизации в сфере ВЭ и обращения с РАО;

В. Б. Уткин — создание цифровых моделей площадок и объектов.

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

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

- 1** КОМПЛЕКСНЫЙ МОНИТОРИНГ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ФЦП ЯРБ-2
- 2** НОРМАТИВНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ПОДДЕРЖКА ПЛАНИРОВАНИЯ И ВЫПОЛНЕНИЯ МЕРОПРИЯТИЙ В СФЕРЕ ЗСЖЦ
- 3** СОЗДАНИЕ ЦИФРОВЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ПЛОЩАДОК И ОБЪЕКТОВ ДЛЯ ЗАДАЧ КОМПЛЕКСНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ВЭ И ОБРАЩЕНИЯ С РАО
- 4** ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПУБЛИЧНОСТИ МЕРОПРИЯТИЙ В СФЕРЕ РЕАЛИЗАЦИИ ФЦП ЯРБ-2

ОСНОВНЫЕ ИТОГИ 2020 ГОДА

1. Комплексный мониторинг эффективности реализации ФЦП ЯРБ-2

- Создана **единая информационно-аналитическая система**, в которой структурированы и актуализированы сведения о выполнении мероприятий Программы за 2016—2020 гг., реализовано интерактивное представление сводных и детализированных данных, отработаны механизмы автоматических оперативных аналитических и справочных отчетов.
- Обеспечена **информационно-аналитическая и методическая поддержка** Госкорпорации «Росатом» при оценке эффективности и результативности реализации мероприятий Программы, расчете целевых показателей и индикаторов, внесении изменений в Программу с учетом выделяемого финансирования и приоритетности работ.
- На основе анализа данных об объемах реализованных работ и их стоимости в рамках проектов по выводу из эксплуатации ЯРОО и обращению с РАО на территории РФ определены **потенциальные направления повышения эффективности**, в том числе на основе сравнительного анализа среднерыночных стоимостей выполнения типовых операций по обращению с РАО в РФ и за рубежом [1].
- Выполнен **сбор данных о текущих затратах** на поддержание в безопасном состоянии объ-

ектов использования атомной энергии, в том числе пунктов хранения РАО, в контуре эксплуатирующих организаций Госкорпорации «Росатом»; предложен подход к стандартизации работ по поддержанию в безопасном состоянии, для которых оценены усредненные удельные стоимости с учетом различных типов и степеней опасности объектов (комплексов объектов); разработана финансово-экономическая модель прогноза ежегодных затрат организаций Госкорпорации «Росатом» на ПБС остановленных ЯРОО наследия с горизонтом планирования до 2050 г.

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

- Разработаны предложения по корректировке проекта **Федерального закона** «О внесении изменений в Федеральный закон от 09.01.1996 № 3-ФЗ «О радиационной безопасности населения». Учитывая важность положений данного закона, специалистами ИБРАЭ РАН подготовлен препринт, в котором предложены возможные направления для комплексного совершенствования нормативной и правовой базы в области обеспечения радиационной безопасности [2]. Исследования ИБРАЭ РАН инициировали начало работ ФМБЦ ФМБА и ряда иных организаций по корреляции законодательных и нормативных



Рисунок 2.2.6 — Прогноз затрат на решение накопленных проблем ядерного наследия

правовых актов Российской Федерации с современными международными требованиями по радиационной безопасности.

- Разработаны предложения по корректировке закона **№190-ФЗ** от 11.07.2011 «Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» [в 2020 г. они прошли согласование с организациями и структурными подразделениями Госкорпорации «Росатом», в 2021 году будут направлены на согласование в ФОИВ].
- В рамках обсуждения внесения изменений в Постановление Правительства РФ от 19 октября 2012 г. **№ 1069** «О критериях отнесения твердых, жидких и газообразных отходов к РАО, критериях отнесения РАО к особым РАО и к удаляемым РАО и критериях классификации удаляемых РАО» специалистами отделения обоснована нецелесообразность ужесточения критериев отнесения отходов к радиоактивным отходам. В результате этого, в рамках согласительного совещания принято решение сохранить существующий подход к установлению критериев отнесения отходов к РАО на основе ПЗУА.
- Продолжена работа над проектом федерального закона «**О ядерном наследии...**», направленного на устранение юридических и правовых пробелов в области обращения с объектами ядерного наследия (ОЯН) и установление норм, предусматривающих определение понятия и критерии отнесения к ОЯН, формирование эффективных организационно-финансовых механизмов решения проблем ликвидации ядерного наследия в РФ, в том числе:
 - уточнение параметров целевой системы управления ОЯН;
 - согласование с заинтересованными ведомствами и предприятиями отрасли;
 - проработка вопросов, связанных с оценкой ключевых рисков законопроекта и ключевых развилок;
 - подготовка уточненного пакета документов и обосновывающих материалов, включая актуализированное финансово-экономическое обоснование для направления на согласование концепции законопроекта в Минэкономразвития России и Минфин России.
- Совместно со специалистами АО «Радиовый институт им. В. Г. Хлопина», ФБУ «НТЦ ЯРБ» и АО «ГНЦ НИИАР» разработаны предложе-

ния по корректировке **НП-019-15** «Сбор, переработка, хранение и кондиционирование жидких радиоактивных отходов. Требования безопасности» в части включения требований к новому компаунду (боросиликатное стекло) для отверждения ЖРО.

3. Создание цифровых информационных моделей площадок и объектов для задач комплексного планирования ВЭ и обращения с РАО

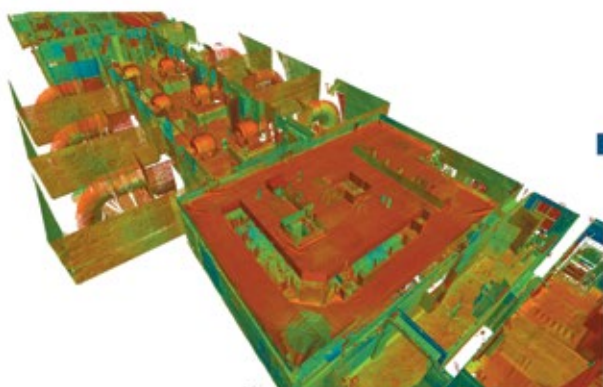
Результаты **применения современных методов информатизации и цифровизации данных** позволяют ликвидировать пробелы в документации, существенно повысить уровень достоверности исходных данных для планирования и проектирования работ по ВЭ, что наиболее актуально для объектов ядерного наследия. Работы по данному направлению включали:

- разработку **комплекса цифровых информационных моделей (ЦИМ)**, содержащих детальные данные по характеристикам площадки и объектов;
- **анализ различных вариантов конечного состояния** площадки и объектов с определением имеющихся рисков при принятии того или иного проектного решения;
- **стоимостную оценку работ по ВЭ** для достижения рассмотренных конечных состояний;
- **создание комплекса расчетных моделей** для сопровождения проектирования работ по ВЭ.

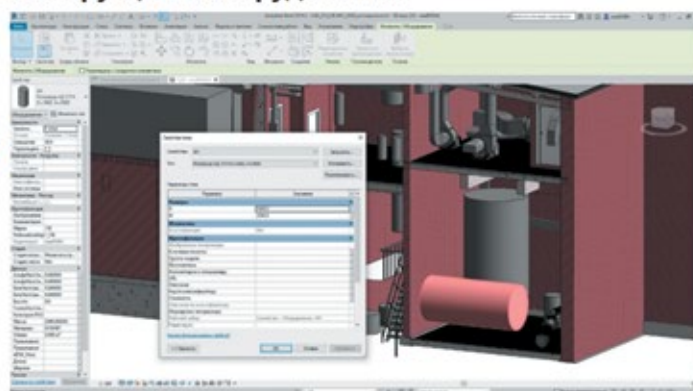
Разработаны ЦИМ для площадок сублиматного производства АО «АЭХК», радиохимического завода АО «СХК» и радиохимического завода ФГУП «ГХК». Построение подобных моделей с использованием комбинации **высокоточного метода лазерного сканирования объектов и территории**, имеющейся проектной и исполнительной документации и данных отчетов КИРО обеспечивает специалистов большим объемом данных об элементах строительных конструкций и оборудования, их расположении в пространстве, массо-габаритных, радиационных и химических характеристиках.

Предложена **методология оценки стоимости приведения ЯРОО к безопасному состоянию** для различных вариантов конечного состояния, включая прогнозирование объемов образования отходов и методов обращения с ними, на основе данных об элементах из ЦИМ объекта [4]. Методология апробирована на примере выполнения расчетов для разработанных моделей площадок сублиматного производства АО «АЭХК» и радиохимического завода АО «СХК».

1. Лазерное сканирование площадки



2. Проработка геометрии элементов строительных конструкций и оборудования

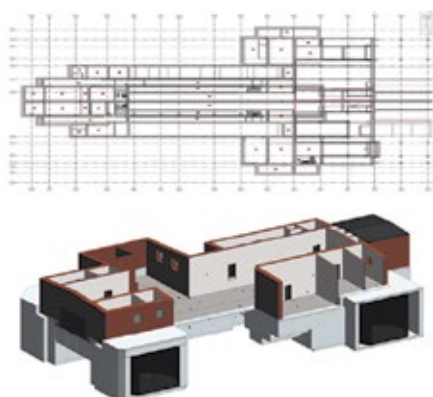


3. Общий вид элементов модели объекта в режиме 3D



Рисунок 2.2.7 – Разработка ЦИМ площадки и объектов площадки АО «СХК»

1. Внесение данных КИРО по загрязнению в ЦИМ



2. Построение картограмм загрязнений по α , β и γ излучению

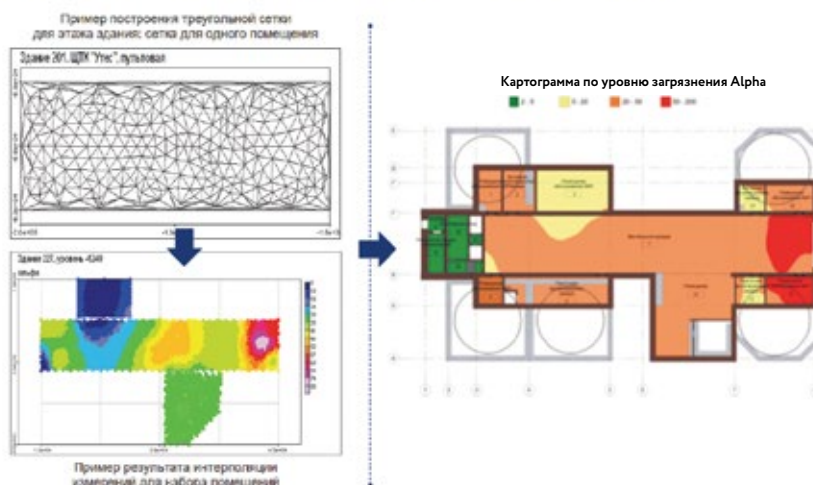


Рисунок 2.2.8 – Внесение данных КИРО и построение картограмм загрязнений в ЦИМ

Разработана **первая версия программного обеспечения** для выполнения расчетов стоимости вывода из эксплуатации ЯРОО, которая позволяет:

- оценивать стоимость дезактивационных и демонтажных работ;
- рассчитывать площади загрязнения поверхностей по помещениям;
- прогнозировать объемы образования РАО в зависимости от выбора методов дезактивации и конечного состояния площадки;
- формировать производственно-технологические цепочки (технологические карты) обращения с РАО и проводить оценку стоимости;
- проводить статистический анализ результатов расчетов.

Совместно с сотрудниками Отделения анализа долгосрочных рисков в сфере обеспечения ядерной и радиационной безопасности разработан **комплекс расчетных моделей для обос-**

нования безопасности конечного состояния площадки или работ по ВЭ объектов, учитывающих возможные пути дозового воздействия на персонал и население с учетом рассматриваемых конечных состояний. Для рассматриваемых площадок СП АО «АЭХК» и площадки З РХЗ АО «СХК» были созданы:

- комплекс моделей, позволяющих **моделировать дозовое воздействие** на население от объектов размещения РАО и промышленных отходов, загрязненных радионуклидами (модель миграции радионуклидов через инженерные барьеры безопасности, гидро-геологическая и миграционная модели района размещения площадок, модель дозового воздействия при различных сценариях водопользования);
- **модель атмосферного переноса** (оценка дозового воздействия на население ближайшего населенного пункта при осуществлении выбросов радиоактивности при проведении работ по ВЭ);

The screenshot shows a software interface for calculating the cost of decommissioning nuclear facilities. The interface is divided into several sections:

- Top Section:** Contains dropdown menus for 'ПЛОЩАДКА' (Site) and 'ЗДАНИЕ' (Building). The selected site is 'АЭХК Новая' and the building is '301'.
- Input Fields:** A grid of input fields for various parameters:
 - АЭХК Новая:**
 - Прометкоды, от: 0, до: 10
 - МОИ, от: 10, до: 50
 - ОНРАО, от: 50, до: 250
 - НАО, от: 250, до: 1250
 - САО, от: 1250, до: 6250
 - ВАО, от: 6250, до: 31250
 - 301:**
 - Площадь под зданием: 10450
 - Толщина удаляемого грунта: 0,8
 - Коэффициент к труду: 1,3815
- Buttons:** A row of buttons for 'Стены' (Walls), 'Полы' (Floors), 'Грунт' (Soil), 'Точки стены' (Wall points), and 'Точки пола' (Floor points).
- Table:** A table with columns for 'Материал' (Material), 'Прометкоды', 'МОИ', 'ОНРАО', 'НАО', and 'САО'. The table lists various materials and their corresponding values.

Материал	Прометкоды	МОИ	ОНРАО	НАО	САО
кирпич	9,802	15,006	0,206	0	0
штукатурка	7,66	19,552	10,309	0	0
бетон (пол)	7,305	19,613	6,639	0	0
бетонная плита (пол)	6,974	45,962	13,79	0,39	0
Чистый металл	11,092	0	0	0	0
Чистый мусор	9,502	0	0	0	0
Оборудование (сталь)	0	0	0	0	358,133
Грунт	612,3	312,7	0	0	0

Рисунок 2.2.9 — Фрагменты интерфейса программного обеспечения для выполнения расчетов стоимости вывода из эксплуатации ЯРОО

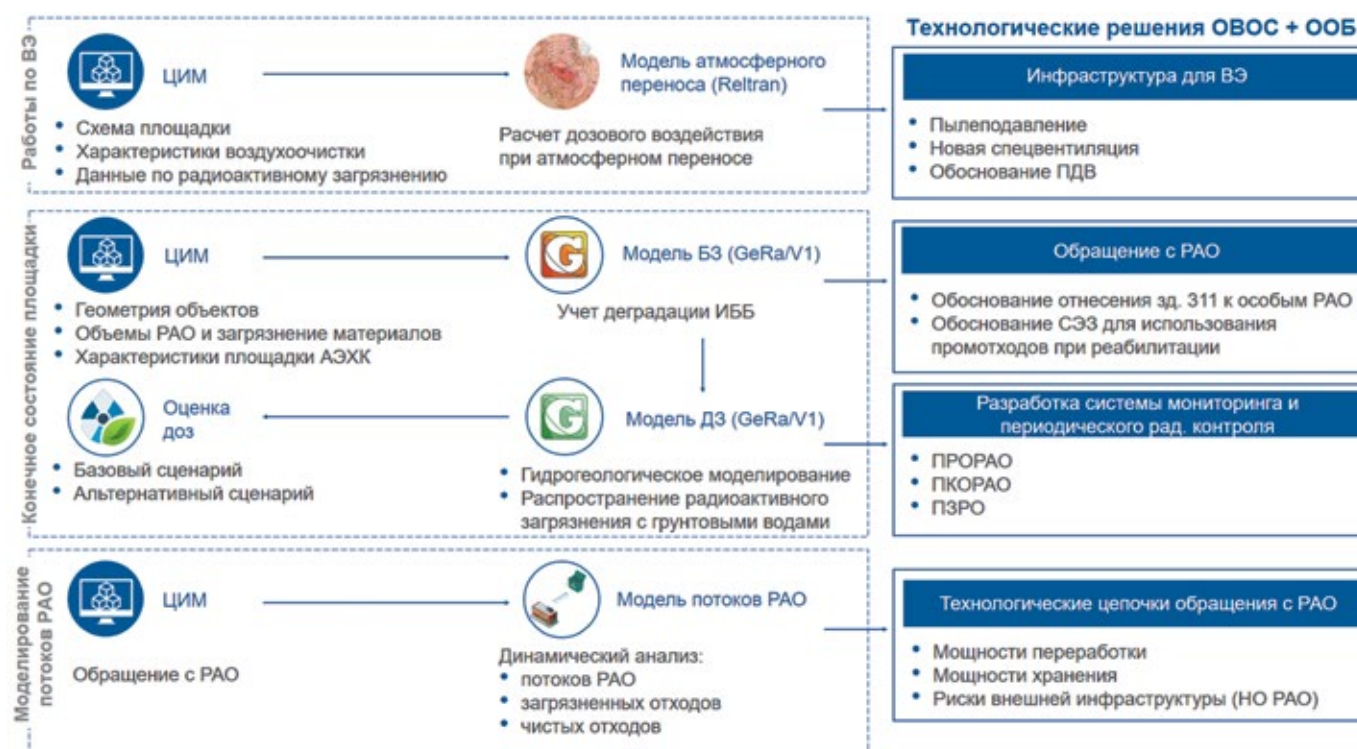


Рисунок 2.2.10 — Взаимодействие цифровых и расчетных моделей при рассмотрении сценариев ВЭ

■ для объектов АО «СХК» также были разработаны **трехмерные модели наиболее радиоактивно загрязненного технологического оборудования зданий** 201 и 252 радиохимического завода АО «СХК» для оценки дозовых нагрузок на персонал при выполнении работ по демонтажу оборудования. С применением указанных моделей начата разработка алгоритмов интерпретации результатов КИРО и формирования оптимизированных требований к проведению радиационного обследования зданий и сооружений.

В результате выполненной работы быликратно снижены **предварительные оценки стоимости работ** по ВЭ за счет детального анализа радиационных характеристик зданий и сооружений, а также использования лучших практик по ВЭ, направленных на минимизацию объемов образования РАО.

Завершены работы по **разработке локальной стратегии по обращению с РАО** для площадки ФГУП «РАДОН» (г. Сергиев Посад, Московская область). Ключевым рассматриваемым вопросом в рамках работы было определение стратегии в отношении ПХ накопленных РАО и определение первоочередных мероприятий по ее реализации [5]. Сравнительный анализ критериев, определяющих отнесение РАО к особым и удаляемым РАО (затраты на завершающую стадию жизненного цикла, дозы на

персонал и население, риски потенциального облучения) показал, что для подавляющего большинства ПХ выполняются критерии отнесения отходов к особым РАО. По результатам работы сформирован перечень приоритетных мероприятий, направленный на окончательное определение стратегии в отношении ПХ накопленных РАО и формирования технологического облика предприятия с учетом его новой целевой функции — отраслевого оператора по наследию.

4. Обеспечение публичности мероприятий в сфере реализации ФЦП ЯРБ-2

Проведены три технических тура с участием общественности, экспертного сообщества и СМИ на предприятия: АО «СХК» (г. Северск, Томская область), АО «ВНИИНМ» (г. Москва), ФГУП «НО РАО» (г. Новоуральск, Свердловская область) — площадки реализации мероприятий Программы. Материалы по итогам мероприятий и иные новости о реализации ФЦП ЯРБ-2 представлены на сайте фцп-ярб2030.рф.

Организованы **четыре круглых стола** по вопросам реализации мероприятий Программы и смежной тематике ЯРБ, в которых принимало участие 30—50 экспертов — членов Общественного совета Госкорпорации «Росатом» и представителей предприятий-участников,

экологических, общественных организаций, научного сообщества; в условиях пандемии 2020 года все запланированные мероприятия были проведены с соблюдением карантинных мер в режиме онлайн.

В конце 2020 года подведены **итоги 1-го этапа реализации ФЦП ЯРБ-2**, по этому поводу в 2021 году планируется выпуск информационно-аналитического материала «Итоги реализации федеральной целевой программы «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016—2020 годы и на период до 2030 года» в 2016—2020 гг.»

В 2020 году сотрудниками ИБРАЭ РАН совместно с коллегами из ФБУ «НТЦ ЯРБ» подготовлена редакция **Шестого Национального доклада Российской Федерации**, утвержденная руководителями Госкорпорации «Росатом» А. Е. Лихачевым и Ростехнадзора А. В. Алешиным. Национальный доклад размещен на международном сайте Объединенной конвенции и в настоящее время рассматривается странами участниками Конвенции в целях подготовки вопросов и комментариев.



ПОДВЕДЕНЫ ИТОГИ 1-го ЭТАПА РЕАЛИЗАЦИИ ФЦП ЯРБ-2

чевым и Ростехнадзора А. В. Алешиным. Национальный доклад размещен на международном сайте Объединенной конвенции и в настоящее время рассматривается странами участниками Конвенции в целях подготовки вопросов и комментариев.



Рисунок 2.2.11 —

Техтур на площадку ППЗРО.
Фото: Юрий Доронин,
газета «Нейва», г. Новоуральск



Рисунок 2.2.12 —

Техтур на площадку
АО «ВНИИНМ», г. Москва.
На фото специалисты,
выполняющие работы
по ВЗ ЯРОО

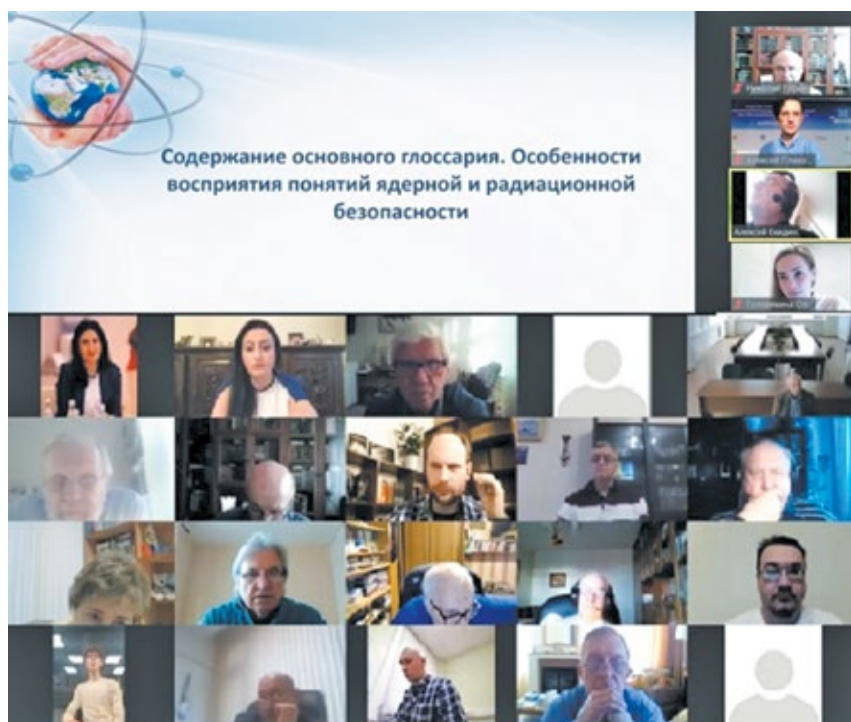


Рисунок 2.2.13 — Круглый стол «Основные понятия ядерной и радиационной безопасности: экспертный глоссарий, проблемы восприятия» в режиме онлайн

КЛЮЧЕВЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАБОТ

1. Ильясов Д. Ф., Иванов А. Ю., Кузнецова Е. О., Будунова А. С., Степанян П. О., Михайленко А. А. Сравнительный анализ стоимости операций по обращению с РАО на российском и международном рынках // Радиоактивные отходы. 2020. — № 4 (13). — С. 14–21. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-4-14-21.
2. Ведерникова М. В., Линге И. И., Панченко С. В., Стрижова С. В., Супатаева О. А., Уткин С. С. Актуальные вопросы внесения изменений в Федеральный закон от 9 января 1996 г. № 3-ФЗ «О радиационной безопасности населения». — (Препринт / Ин-т проблем безопас. развития атом. энергетики РАН, № IBRAE-2020-03). — М.: ИБРАЭ РАН, 2020. — 22 с. — Библиогр.: 20 назв. — 125 экз. — ISBN 978-5-6041296-5-4.
3. Линге И. И. Обеспечение радиационной безопасности при обращении с РАО: дозы облучения и перспективы развития регулирующих основ // Радиоактивные отходы. 2020. — № 2 (11). — С. 6–16. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-2-6-16.
4. Александрова Т. А., Иванов А. Ю., Линге Ин. И., Лунов Д. М., Савельева Е. А., Самойлов А. А., Уткин В. Б. Оценка объемов образования РАО от вывода из эксплуатации с использованием информационных моделей // Радиоактивные отходы. 2020. — № 3 (12). — С. 19–31. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-3-19-31.
5. Лужецкий А. В., Невров Ю. В., Ведерникова М. В., Иванов А. Ю., Линге Ин. И., Неуважаев Г. Д., Савельева Е. А., Шпиньков В. И., Понизов А. В. О создании интегральной информационной модели для определения стратегии развития промышленного комплекса по обращению с радиоактивными отходами ФГУП «РАДОН» // Радиоактивные отходы. 2020. — № 1 (10). — С. 101–112. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-1-101-112.
6. Супатаева О. А., Стрижова С. В. Международно-правовые основы регулирования обращения с радиоактивными отходами в Российской Федерации // Радиоактивные отходы. — 2020. — № 3 (12). — С. 7–18.



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



НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ
НАПРАВЛЕНИЯ

Советник РАН

А. А. Саркисов

академик РАН

(sarkisov@ibrae.ac.ru)



Заместитель директора

С. В. Антипов

д.т.н

(santipov@ibrae.ac.ru)

КЛЮЧЕВЫЕ СПЕЦИАЛИСТЫ

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

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

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

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

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

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ в 2020 году

- 1 ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
- 2 РЕКОНСТРУКЦИЯ И ОЦЕНКА ПОСЛЕДСТВИЙ ЯДЕРНОЙ АВАРИИ НА АПЛ В БУХТЕ ЧАЖМА
- 3 НАУЧНО-ОРГАНИЗАЦИОННОЕ И АНАЛИТИЧЕСКОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ РАБОТ ПО ПОВЫШЕНИЮ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТОВ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ
- 4 РАБОТЫ ПО ЭКСПЛУАТАЦИИ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОГРАММОЙ КОМПЛЕКСНОЙ УТИЛИЗАЦИИ ОБЪЕКТОВ АТОМНОГО ФЛОТА

ОСНОВНЫЕ ИТОГИ 2020 ГОДА

1. Исследования радиозологических проблем Арктической зоны Российской Федерации

Программные документы самого высокого государственного уровня ставят задачу опережающего развития Арктической зоны Российской Федерации. В современном мире это невозможно без значительного увеличения доли и количества объектов атомной энергетики, т.е. потенциально радиационно опасных объектов. К названным объектам в Арктике относятся атомные ледоколы, транспортабельные и стационарные атомные станции малой и средней мощности, атомные источники энергообеспечения комплексов добычи полезных ископаемых, объекты морской и аэронавигации вдоль трассы Северного морского пути и т.д. В многофакторной задаче обеспечения безопасности этих объектов важным звеном является научно обоснованная и современная система прогноза и оценки угроз и рисков на случай возможных радиационных аварий на них и выработка предложений для принятия необходимых мер по минимизации негативных последствий аварий.

В этой связи актуальным является необходимость глубокого и всестороннего изучения специфики, связанной с использованием ядерной энергии в Арктической зоне и, особенно, радиозологических проблем, вызванных аварийными ситуациями.

Для получения оперативных и максимально точных прогнозов последствий возможных гипотетических аварий, в первую очередь, необходимо иметь достоверную информацию о типах, количестве, местах постоянной дислокации, вероятных маршрутах, графиках передвижения и стоянок, пунктах технического обслуживания, ремонта и перегрузок ядерного топлива и т.д.

Такая информация должна касаться не только имеющихся в наличии ЯЭУ, но и вновь планируемых к сооружению объектов. Поскольку утвержденных планов сооружения новых установок нет, требуется провести анализ состояния ведущихся разработок, оценить востребованность их результатов, конкурентоспособность и т.п. По результатам такого анализа будут выделены типы ЯЭУ, наиболее вероятные с точки зрения реализации в обозримом будущем, и места их расположения.

Поскольку в ближайшем будущем наиболее вероятное возникновение потребности в электроэнергии в Арктике будет связано с развитием Севморпути, можно полагать, что местами размещения стационарных АСММ станут порты, в которых планами развития этой магистрали намечен значительный рост грузооборота. К ним относятся порты Сабетта, Тикси и Диксон. Также в качестве перспективного потребителя электроэнергии стоит выделить Баимскую рудную зону, энергоснабжение которой рассматривается со стороны Чаунской губы. Информация о перспективных ЯЭУ и местах их возможного размещения приведена в табл. 2.2.1.

Таблица 2.2.1. Перспективные морские и береговые пункты размещения АСММ в Арктике

Пункт размещения	Перспективные электрические нагрузки	Возможный тип РУ
Арх. Новая Земля (Баренцево море), Безымянная губа	Освоение свинцово-цинкового месторождения «Павловское»	АСММ на базе реакторной установки «Шельф-М»
Гипотетическая нефтяная платформа в Баренцевом или Карском море	Разведочное и эксплуатационное бурение скважин, нефтедобыча	АБВ-6Э, Порт Диксон «Шельф-М»
Порт Диксон	Реконструкция и расширение порта Диксон, транспортной и социальной инфраструктуры, разработка месторождения коксующихся углей	
Порт Тикси	Реконструкция и расширение порта, транспортной и социальной инфраструктуры	
Порт Сабетта, Ямало-Ненецкий АО	Реконструкция и расширение порта, транспортной и социальной инфраструктуры	КЛТ-40С, РИТМ-200М
г. Певек, мыс Наглейный, Чукотский АО	Развитие Чаун-Билибинского энергоузла для освоения месторождений минерально-сырьевых ресурсов (в т.ч. электрификация Баимской рудной зоны). Замещение ПАТЭС на время капитального ремонта	ПАТЭС с двумя РУ КЛТ-40С (в эксплуатации), РИТМ-200М

Учитывая, что исследования радиозоологических проблем, вызванных гипотетическими авариями, требуют изучения их последствий для максимального количества географических точек, и принимая во внимание ограниченность ресурсов, для моделирования необходимо выбрать некоторые представительные объекты.

Два пункта в Арктике могут рассматриваться как представительные: ФГУП «Атомфлот», расположенное в г. Мурманск, и ПАТЭС «Академик Ломоносов», размещенная в бухте Певек Восточно-Сибирского моря.

ФГУП «Атомфлот» является базой обслуживания атомного ледокольного флота, что гарантирует присутствие в ней плавучих объектов с ЯРОО. Кроме того, здесь находится площадка временного хранения контейнеров с отработавшим ядерным топливом (ОЯТ).

В бухте Певек размещена и находится в промышленной эксплуатации первая в мире ПАТЭС «Академик Ломоносов». Проектом предусмотрено, что после выработки каждой из реакторных установок четырех циклов топливных кампаний (по 3 года) ПАТЭС будет вывезена из региона для перегрузки топлива и капитального ремонта, который продлится 2 года, и замещена новой ПАТЭС.

Для оценки угроз и рисков в случае возможных радиационных аварий необходимо разработать сценарии аварий с выходом радиоактивных веществ в окружающую среду и оценить состав, величину и параметры радиоактивного выброса для каждого из этих сценариев, предусмотрев возможность проведения математического моделирования процессов распространения радиоактивных веществ от места аварии в атмосфере и акватории, что позволит получать картину радиационной обстановки в любой точке на любой момент времени.

При исследовании аварийных ситуаций учитывался опыт эксплуатации судовых реакторов, поскольку технологической основой разработки и дальнейшего развития рассматриваемых ЯЭУ являются именно судовые установки. Поступление значительных количеств радиоактивных веществ в окружающую природную среду (ОПС) возможно при крупных радиационных авариях, в частности:

- при возникновении самоподдерживающейся цепной реакции (СЦР) во время перезарядки (в частном случае — выгрузки) реакторов ЯЭУ;
- при нарушении герметичности бассейнов-хранилищ отработавших тепловыделяющих сборов (ОТВС), береговых (плавучих)

емкостей для сбора и хранения средне и высокоактивных ЖРО (объемная активность 10^{-5} — 1 Ки/л);

- при несанкционированных сливах средне- и высокоактивных ЖРО с кораблей с ЯЭУ, плавучих технических баз (ПТБ) и плавучих технических танкеров.

Наиболее тяжелые последствия возможны при возникновении СЦР, так как при этом может быть расплавлено значительное количество ОЯТ, что приведет к его диспергированию с выбросом накопленных продуктов деления в ОПС.

Если СЦР происходит в активной зоне, заполненной водой, температура топлива почти мгновенно достигает значений, достаточных для плавления материалов а.з. Взаимодействие фрагментов ОТВС с перегретой водой влечет за собой паровой взрыв. Взрывом выбрасываются фрагменты диспергированного ОЯТ, над реактором возникает кратковременный паровоздушный выброс, насыщенный аэрозолями. Тяжелые фрагменты разлетаются в непосредственной близости от очага аварии (на расстояние около 100 м). На объекте может возникнуть пожар, усиливающий распространение радиоактивных материалов в атмосфере. Следует также принимать во внимание наличие хранилищ ОЯТ на плавучих ЯРОО. Так, при транспортировке ПАТЭС «Академик Ломоносов» в её хранилищах может находиться ОЯТ 8 активных зон реакторов.

Степень достоверности полученной картины существенно зависит от качества применяемой математической модели. Поскольку идеальной модели не существует, требуется постоянно совершенствовать имеющиеся. Одной из основных целей работы в 2020 году было создание интегрированного комплекса математических моделей различных сред (атмосфера, морской лед, океан) и численных алгоритмов переноса Лагранжевых частиц в воздушной и морской средах. При этом необходимо было обеспечить идентичность используемых в моделях внешних параметров расчета (климатические условия, локализация источника и т.п.), а также синхронизировать пространственно-временные параметры представления результатов для передачи данных в другую модель. Разработанный комплекс моделей может использоваться для расчета и анализа радиозоологических последствий аварийных ситуаций на ядерных энергетических установках с выходом радионуклидов в окружающую среду.

Для моделирования переноса в атмосфере выбрано программное средство (ПС) ПАРРАД, разработанное в ИБРАЭ РАН. Оно основано на транспортной модели NOSTRADAMUS и региональной гидродинамической модели WRF-ARW. В модели используется модифицированный Лагранжев подход (ЛП), в котором моделируемые точки являются центрами облаков. Результатом расчетов является пространственно-временное поле концентрации радиоактивного вещества в атмосфере. При расчете концентрации аэрозолей и газов, которые можно считать пассивной примесью, в этой модели учитываются сухое осаждение, вымывание осадками и радиоактивный распад.

Моделирование распространения радионуклидов в заливах, устьях рек, а также их выноса в открытое море проводится в рамках разрабатываемой в ИБРАЭ РАН модели, основанной на усовершенствованном уравнении Сен-Венана. Для водоемов, у которых ширина значительно меньше длины, это приближение вполне допустимо. Перенос пассивной примеси моделируется отдельным расчетным модулем, в котором имеется неоднородное поле турбулентной диффузии в горизонтальном и вертикальном направлениях. Таким способом модель двумерной гидродинамики сопряжена с трехмерной моделью адвекции-диффузии примеси.

Перенос радиоактивной примеси в арктических морях предлагается рассчитывать на основе модели динамики океана ИВМИО 4.1, морского льда CICE 5.1 и платформы для моделирования CMF 2.0. В модель должно быть включено усовершенствование алгоритмов численных расчетов переноса примеси на акватории при поступлении радионуклидов от комбинированного распределенного во времени и пространстве источника (площадного из атмосферы и объемного выноса из залива).

Текущая расчетная схема модели ИВМИО в ЛП различает два вида частиц: «легкие» с нейтральной плавучестью и «тяжелые», имеющие

отрицательную плавучесть. Для «тяжелых» частиц к вертикальной составляющей скорости движения среды в точке нахождения частицы добавляется гравитационная составляющая, направленная ко дну и обусловленная действием гравитации. В текущей версии модели величина этой составляющей принята постоянной и равной 1,54 мкм/с, что соответствует характерному размеру частиц 1 мкм и оседанию в спокойной воде на 1 м за 7 дней.

Ранее проводились расчеты распространения радионуклидов в модели ИВМИО, основанной на Эйлеровом подходе (ЭП). Сравнение результатов, полученных в ЛП и ЭП, показывает, что в начальный период расчета на небольших расстояниях от источника прогнозируемые размеры пятна загрязнения и максимальной концентрации радионуклидов в пятне различаются довольно сильно. Такое различие вполне ожидаемо, так как начальный размер пятна загрязнения в момент выброса отличается в обоих подходах на несколько порядков величины. В ЭП начальная площадь пятна загрязнения равна площади ячейки расчетной сетки, в которой находится источник. В ЛП характерные размеры пятна загрязнения определяются размером источника. Характерная площадь ячеек расчетной сетки составляет $1,5\text{—}2,5 \cdot 10^7 \text{ м}^2$, в то время как площадь источника при залповом выбросе (даже с учетом возможного разброса частиц за счет взрывной волны) едва ли превысит $10^4\text{—}10^5 \text{ м}^2$. Соответственно, концентрация примеси в ячейках, близких к источнику, в начальный период после выброса оказывается в ЛП заметно выше, чем в ЭП, как это видно из табл. 2.2.2 и рис. 2.2.14.

В ЛП каждая частица примеси в каждый момент расчетного времени имеет точные собственные координаты: географические долготу, широту и глубину в метрах. Это предоставляет хорошую возможность проведения детального траекторного анализа. Например, можно детально проследить траекторию движения частиц, попадающих в заданную область акватории в

Таблица 2.2.2. Распространение ^{137}Cs в поверхностном слое воды после аварии на АПЛ Б-159

	Эйлерова модель переноса		Лагранжева модель переноса	
	Через 3 дня после аварии	Через 18 дней после аварии	Через 3 дня после аварии	Через 18 дней после аварии
Максимальная концентрация (кБк/м ³)	14,65	0,77	63,96	4,32
Расстояние до максимума концентрации (км)	14	43	17	75
Площадь пятна с концентрацией выше 100 Бк/м ³ (км ²)	603	3966	97	1920

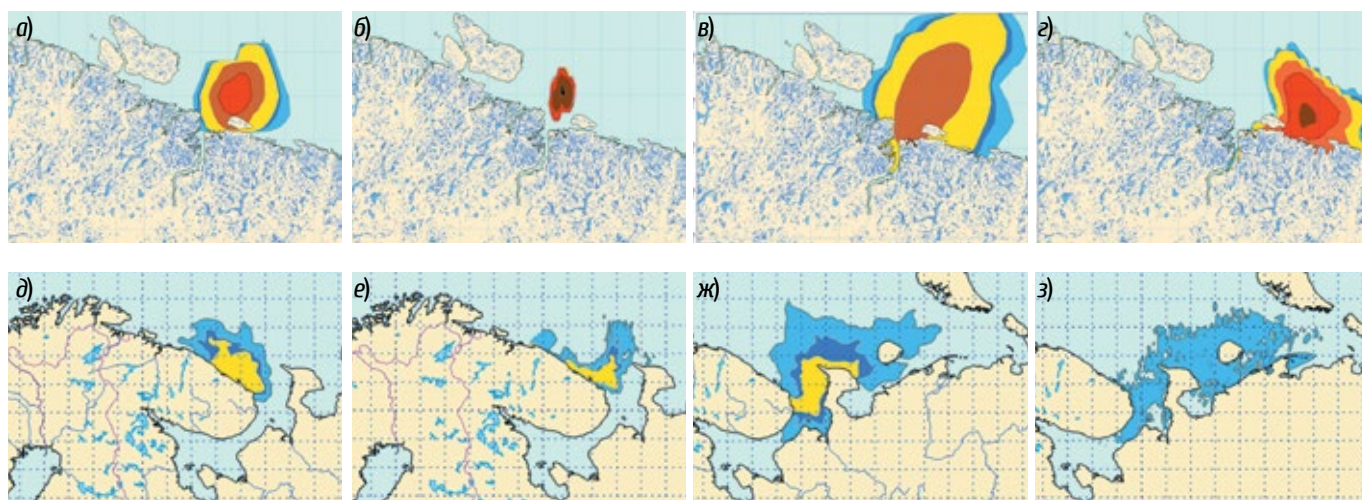


Рисунок 2.2.14 — Концентрация ^{137}Cs после выброса 50 ТБк из АПЛ Б-159 на поверхности через 3 (а, б), 13 (в, г), 103 (д, е) и 268 (ж, з) дней после аварии в Эйлеровом (а, в, д, ж) и Лагранжевом (б, г, е, з) подходах

заданном интервале времени. При этом можно также определить среднюю скорость движения частицы на каждом временном интервале.

На рис. 2.2.15 представлены примеры траекторий двух частиц, зашедших в Белое море после аварии на АПЛ Б-159 с мгновенным выбросом на поверхности (верхний ряд) и графики скорости движения этих частиц по траектории за все время расчета.

В условиях Арктики наличие значительного количества льда в акватории является обычной ситуацией и требует адекватного учета как в описании процессов теплообмена, так и в моделировании переноса примеси.

Модель ИВМИО имеет компоненту, описывающую возникновение льда, его перемещение, а также некоторые физические процессы при переходе воды из одного агрегатного состояния в

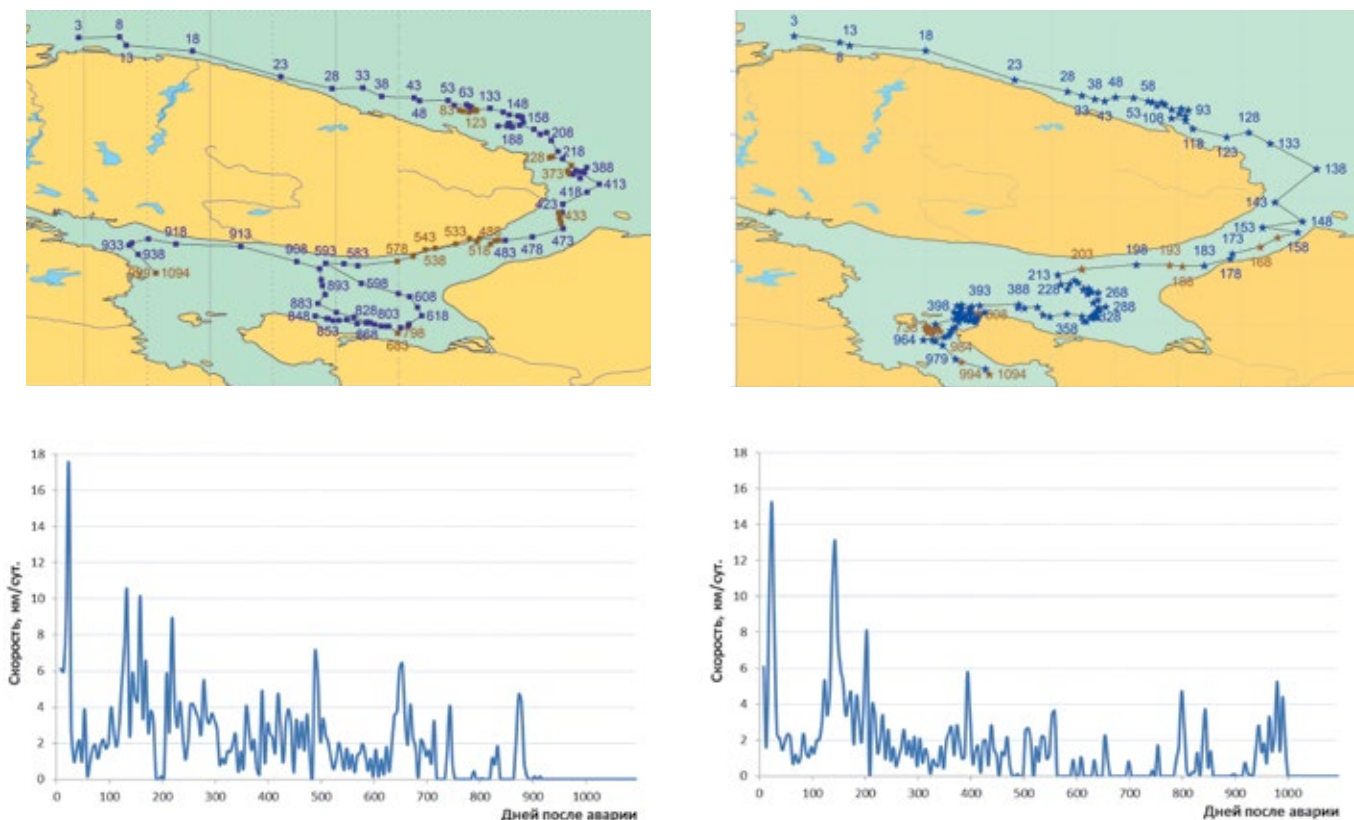


Рисунок 2.2.15 — Примеры траекторий частиц, заходящих в Белое море (верхний ряд), и скорость их движения по траекториям, км.сут. (нижний ряд). Числовые метки на траекториях обозначают количество дней после аварии; цвет символов и меток соответствуют режиму движения частицы: ● — свободное движение, ○ — движение во льду, ● — движение в придонном слое

другое. Предлагаемая реализация модели учитывает возможность перехода частиц радионуклидов в лед. Частица примеси, попавшая в лед, продолжает движение в океане, но уже не со скоростью океанических течений, а со скоростью перемещения льда. В простейшем приближении частица может попасть в область льда из слоя поверхностных ячеек при выполнении следующего условия:

$$x_{\text{rand}} \leq \frac{\Delta V_{\text{frozen}}^{(i,j,\theta)}}{V_{\text{cell}}^{(i,j,\theta)}},$$

где:

x_{rand} — случайное число, распределенное равномерно в интервале $[0, 1]$;

$\Delta V_{\text{frozen}}^{(i,j,\theta)}$ — объем намерзшего льда в ячейке за шаг по времени в модели;

$V_{\text{cell}}^{(i,j,\theta)}$ — объем ячейки координатной сетки.

При выполнении этого условия частица меняет свой режим движения и продолжает перемещаться со скоростью льда. Вычисление очередного значения координат частицы происходит согласно регулярному алгоритму.

На рис. 2.2.16 показана динамика «вмерзания» и «вытаивания» частиц в зависимости от времени, прошедшего после начала мгновенного выброса из АПЛ «Б-159». Поскольку момент выброса приходится на летний сезон (1 августа первого модельного года), а источник находится в незамерзающей части акватории Баренцева моря, попадание частиц в область льда происходит лишь при распространении пятна загрязнения в более высокие широты и в более холодный сезон — через ~3,5 месяца после начала выброса на широте около 68,8° СШ. Поэтому количество вмерзших в лед частиц со-

ставляет лишь малую долю общего выброса. Ситуация может сильно измениться в случае, когда выброс произойдет в точке, где лед присутствует в течение более длительного времени, и в момент значительного замерзания района аварии.

Как видно из рис. 2.2.16, изменение количества находящихся во льду частиц имеет хорошо выраженный сезонный характер, в целом соответствующий климату Арктики.

На рис. 2.2.17 показано состояние льда и расположение вмерзших в лед частиц в моменты, когда их количество достигает локальных максимумов:

Траекторный анализ перемещения частиц радиоактивной примеси во льду представляет особый интерес. Такой механизм перемещения примеси существенно отличается от обычного перемещения пятна загрязнения в океане: за время нахождения во льду объемная концентрация радиоактивности не меняется. В результате в процессе таяния льда в водной среде появится источник активности, который может быть удален на большое расстояние от места выброса, а его появление может произойти через длительное время после аварии, когда концентрация активности в пятне обычного загрязнения уже упала до низких значений.

На рис. 2.2.18 представлен пример траектории частицы, вмерзшей в лед и впоследствии вернувшейся в океанскую среду при таянии льда (верхний рисунок), и график скорости движения частицы (нижний рисунок). Можно обратить внимание на то, что выбранная частица провела в замороженном состоянии около 5 месяцев и продрейфовала во льду свыше 3 000 км.



Рисунок 2.2.16 —
Динамика «вмерзания» и
«вытаивания» частиц за весь
период моделирования

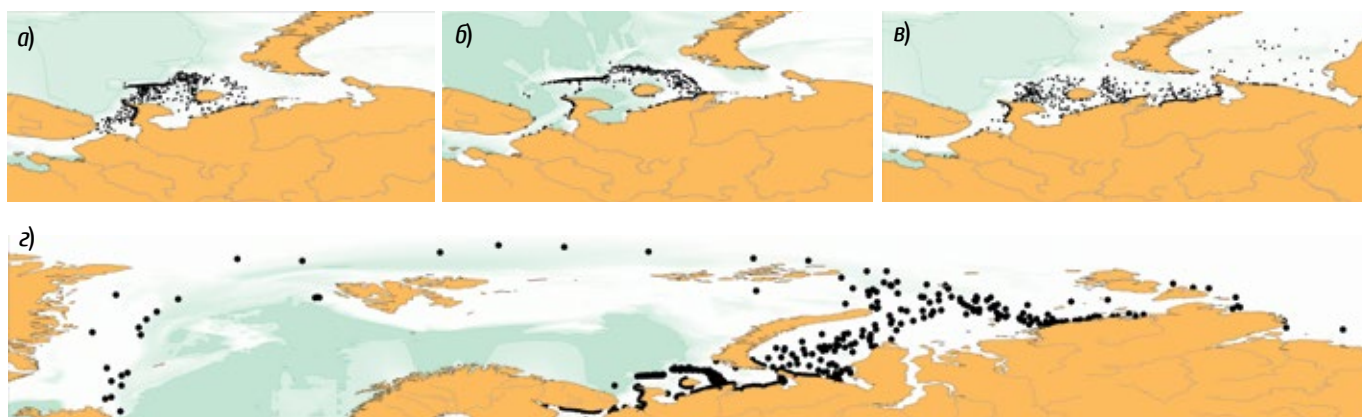


Рисунок 2.2.17 — Состояние льда и расположение вмерзших в лед частиц через 183 (а), 253 (б), 523 (в) и 999 (г) дней после аварии

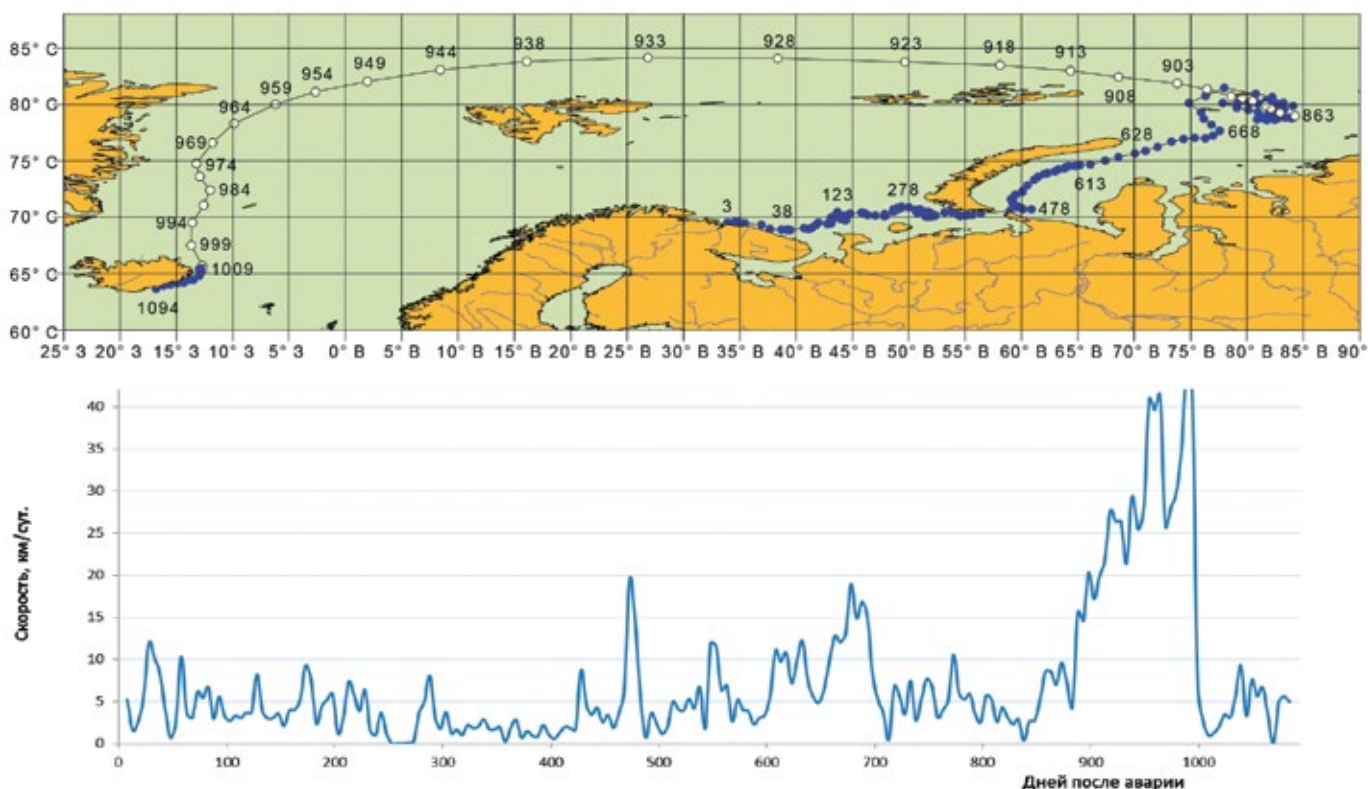


Рисунок 2.2.18 — Пример траектории частицы, замороженной в лед в течение длительного времени. Обозначения числовых меток и режимов движения те же, что на рис. 2.2.15

2. Реконструкция и оценка последствий ядерной аварии на АПЛ К-431 в бухте Чажма

В 2020 г. ИБРАЭ РАН и ДВО РАН завершили совместные исследования по радиоактивному загрязнению Уссурийского залива в результате аварии 10 августа 1985 г. в бухте Чажма. Были получены результаты моделирования распространения примеси в первые 4 суток после аварии. Для расчетов использовалась региональная модель ROMS ДВО РАН. Форма и начальные условия были предоставлены ИБРАЭ РАН на основе результатов моделирования переноса радиоактивных веществ в ат-

мосфере в исследованиях 2018 г. (рис. 2.2.19). Установлено, что радиоактивное пятно все время оставалось в центральной области залива. 14 августа 1985 г. прошел тайфун, который перемешал воду и резко понизил активность в пятне до фона.

Проведены анализ и оценка влияния поражающих факторов на человека и окружающую среду (ударная волна, световое излучение, электромагнитный импульс и радиационное воздействие). Человеческие потери: от ударной волны мгновенно погибли — 10 чел., через несколько лет умерли от радиационного воздействия — 2 чел.

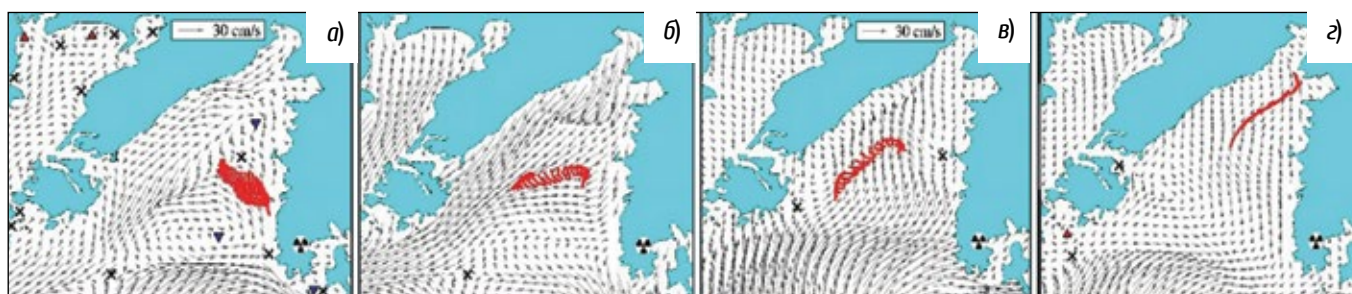


Рисунок 2.2.19 — Эволюция переноса и трансформации поверхностного радиоактивного загрязнения морской воды в Уссурийском заливе в период с 11 по 14 августа 1985 г. (знак радиации — место аварии 10 августа 1985 г. ЯЭУ на АПЛ К-431 в бухте Чажма)

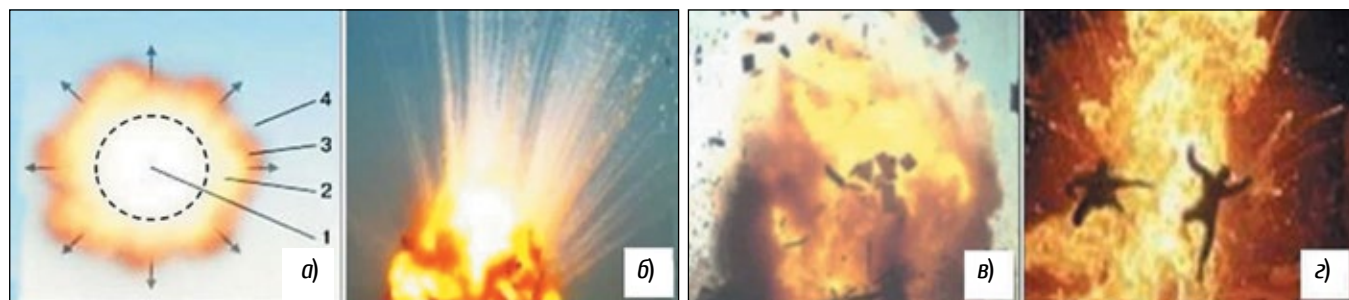


Рисунок 2.2.20 — Ретроспектива взрыва: (а) в реакторном отсеке (1 — центр реактора, 2 — газообразные продукты, 3 — зона сжатого воздуха, 4 — фронт ударной волны); (б) над подводной лодкой — выброс диспергированного топлива и мелких фрагментов активной зоны; (в) — разрушение укрытия «Зима» и выброс крышки реактора; (г) — выброс фрагментов людей

Подъем корабельным краном крышки реактора, в ходе которого возникла СЦР, привел к разгерметизации реактора под давлением до 40 МПа; произошел тепловой взрыв. Он разрушил корабельный реактор и оборудование отсека АПЛ, давление понизилось до 1—3 МПа, но оставалось смертельным (в ~100 раз превышало безопасный уровень, рис. 2.2.20).

Электромагнитный импульс (ЭМИ). Можно выделить три временных момента формирования ЭМИ: $t < 0,4$ нс (проникающая радиация внутри реактора с выходом излучения за пределы его корпуса); $t \sim 40$ —50 мс (после разгерметизации реактора); $t \sim 0,1$ —0,5 с (выход радиоактивных веществ в окружающую среду через технологический вырез в прочном корпусе АПЛ. Ни один из этих ЭМИ не привел к выводу из строя электронной аппаратуры и гибели людей.

Световое излучение. Возникло при выбросе расплава $^{235,238}\text{U}$ с $T > 4000^\circ\text{C}$ в реакторный отсек. Над АПЛ оно проявилось в виде огненной полусферы диаметром 4—5 м с температурой 900—1100 °C и просуществовало в течение 1—2 с. В реакторном отсеке возник пожар, проявились вторичные поражающие факторы: открытый огонь, высокая температура, токсичные продукты горения и газы. Ни один из этих факторов не оказал существенного влияния на плавучую мастерскую и людей.

Радиационный фактор. В течение 2—5 с кратковременную опасность представляло поднимавшееся над АПЛ грибовидное радиоактивное облако, мощность дозы от «ножки» превышала 100 Зв/ч, мощность дозы от вершины варьировалась в диапазоне 1—10 Зв/ч. МЭД на корпусе аварийной АПЛ составляла 0,13 Зв/ч, на пришвартованных рядом с ней АПЛ К-42 и судах обслуживания 0,01—0,06 Зв/ч, на пирсах и в береговой полосе 0,005—0,02 Зв/ч. Уровень бета-загрязнения составлял 10^6 — 10^7 расп/(см²·мин). На берегу, береговых объектах и на мелководье МЭД от разлетевшихся фрагментов а.з. реактора достигала 0,5—2 Зв/ч.

Разрушения. После аварии состояние АПЛ исключало ее восстановление, поэтому она была утилизирована на заводе «Звезда» до трехотсечного блока и в 2011 г. помещена в пункт изоляции в бухте Разбойник. Находившаяся рядом с ней АПЛ К-42 также не восстанавливалась (по причине сильного радиационного загрязнения) и в 2003 г. была утилизирована. Плавучая мастерская спустя год после аварии была введена в строй и около 15 лет использовалась по назначению.

На основе материалов этих исследований в настоящее время под руководством академика А. А. Саркисова проводится работа по изданию монографии.

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

В Постановлении Правительства РФ №1248 от 19.11.2015 г. об утверждении федеральной целевой программы «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016—2020 годы и на период до 2030 года» (ФЦП ЯРБ-2) содержится пункт 9.3 — «Проведение работ по повышению радиационной безопасности объектов Российской академии наук», в соответствии с которым ИБРАЭ РАН в течение последних 12 лет обеспечивает организацию необходимых работ на объектах РАН. За это время по данному направлению в 49 организациях РАН реализованы 542 проекта (рис. 2.2.21).

На рисунке 2.2.22 представлено распределение выполненных проектов по повышению радиационной безопасности (РБ) в организациях РАН по регионам РФ. Видно, что до 2015 года наибольшее количество работ выполнялось в

Москве, в регионах Урала и Сибири число участников было более-менее стабильно, с 2015 г. присоединились к программе Дальний Восток и г. Севастополь.

В 2016 году Правительством РФ была проведена реформа РАН, в результате которой произошло присоединение к ней двух отраслевых академий — Российской академии медицинских наук и Российской академии сельскохозяйственных наук, что привело к увеличению общего количества проблемных с точки зрения радиационной безопасности объектов РАН.

Широкая география размещения исследовательских объектов, организаций и филиалов Минобрнауки по регионам РФ, о наличии в этих организациях действующих и выведенных из эксплуатации реакторов, ИИИ, РВ, РАО, а также отсутствие достоверной информации о состоянии объектов — все это определяет необходимость разработки специальной базы данных с целью информационно-аналитического обеспечения работ по РБ на этих объектах.

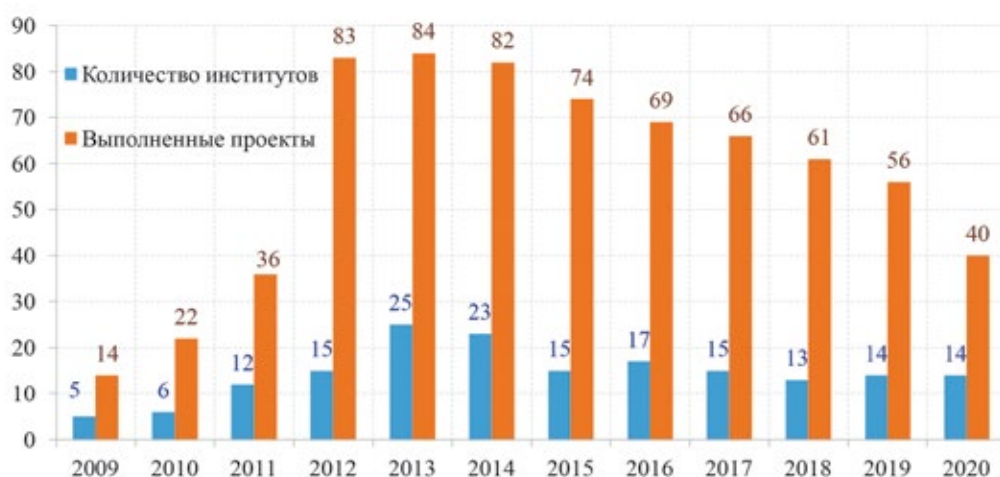


Рисунок 2.2.21

Динамика проведенных работ на объектах организаций РАН за период 2009—2020 гг.

В 2020 году работы по повышению радиационной безопасности выполнены в 14 организациях РАН по следующим направлениям:

Направления Работ	Кол-во организаций
Выполнение работ по приведению помещений для работы по 2 и 3 классу радиационной опасности в соответствие требованиям ФНП РФ по РБ	9
Проведение работ по ремонту систем спецвентиляции в помещениях для работы с ИИИ, РВ, РАО по 2 и 3 классу радиационной опасности	8
Проведение работ по модернизации системы радиационного и дозиметрического контроля	7
Проведение работ для модернизации физической защиты	1
Проведение работ по восстановлению работоспособности подъемно-транспортного оборудования в хранилище РВ и РАО	1
Проведение радиационного обследования в помещениях для работы с ИИИ, РВ, РАО по 2 и 3 классу радиационной опасности	35 помещений

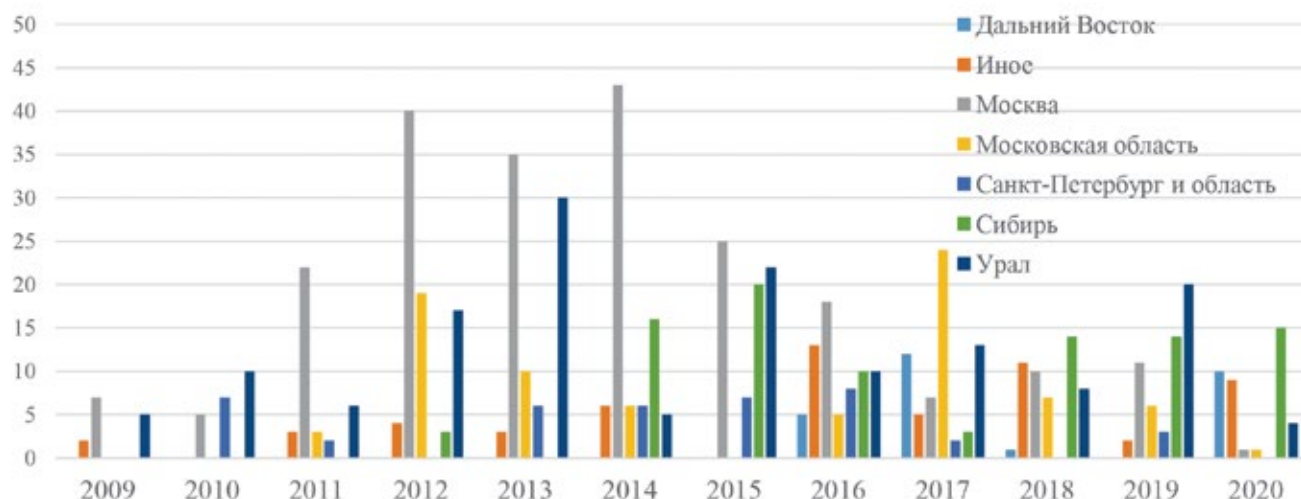


Рисунок 2.2.22 — Распределение выполненных проектов по регионам РФ за период 2009–2020 гг. в представлении по годам

Для этого сотрудниками отдела составлен список соответствующих объектов Минобрнауки, разработаны форма запроса в организации и формуляр для получения необходимой и достаточной информации.

В условиях, когда происходит укрупнение и объединение институтов РАН в Научные центры, со сменой руководящих структур в процессе перехода организаций РАН под управление Минобрнауки, для решения проблем исследовательских объектов Минобрнауки, связанных с состоянием РБ, потребуется доработка «Стратегического плана повышения радиационной безопасности объектов РАН», его актуализация и расширение до «Стратегического мастер-плана повышения радиационной безопасности организаций, входящих в состав Минобрнауки». В этот мастер-план, помимо организаций РАН, войдут и другие образовательные и исследовательские организации.

Многолетний опыт работ по повышению РБ показал эффективность решения проблемы программно-целевым методом. Продолжение работ в этом направлении требует не только доработки и актуализации стратегического мастер-плана, но также адаптации к рассматриваемой задаче и применения ИСУП комплексной утилизации АПЛ, которая была разработана в ИБРАЭ РАН в рамках программы «Глобального партнерства» и успешно используется более 10 лет, позволяя основному заказчику, Госкорпорации «Росатом», эффективно распределять ресурсы, принимать оперативные решения и осуществлять контроль за выполнением основных этапов работ.

4. Работы по эксплуатации информационной системы управления Программой комплексной утилизации (ИСУП) в Северо-Западном и Дальневосточном регионах России

В 2020 г. продолжались работы по эксплуатации ИСУП комплексной утилизации АПЛ, которая находится в промышленной в ГК «Росатом» с 2010 г., и в течение всего этого времени поддержка ИС, актуализация данных и модернизация ПО проводится отделом №12 ИБРАЭ РАН.

В 2020 выполнялись 44 проекта Программы комплексной утилизации:

- утилизация АПЛ и РБ — 8;
- утилизация НК с ЯЭУ — 2;
- утилизация судов АТО — 4;
- реабилитация ПВХ пос. Гремиха — 4;
- реабилитация ПВХ гб. Андреева — 14;
- обращение с ОЯТ — 4;
- обращение с РАО — 8.

По сравнению с 2019 г. количество проектов не изменилось, но их распределение по направлениям сместилось от работ по утилизации плавучих объектов (18 в 2019 г. и 14 в 2020 г.) к работам по реабилитации береговых объектов и обращению с ОЯТ и РАО (26 в 2019 г. и 30 в 2020 г.). Это объективно отражает тот факт, что задачи по утилизации плавучих объектов близятся к завершению, и центр тяжести ПКУ перемещается к реабилитации береговых объектов. Можно отметить, что в Северо-Западном регионе лишь одна АПЛ из числа входивших в первоначальную ПКУ Стратегического

Мастер-плана еще не достигла конечного состояния, все остальные АПЛ, ожидающие утилизации на Северо-Западе, были выведены из состава ВМФ относительно недавно, в послед-

ние несколько лет. Итоговые данные по утилизации АПЛ по состоянию на декабрь 2020 г. приведены в табл. 2.2.3.

Таблица 2.2.3. Итоговые данные по утилизации АПЛ по состоянию на декабрь 2020 г.

Атомные подводные лодки	СФ	ТОФ	Всего
Выведено АПЛ из состава ВМФ	124	83	207
Утилизировано АПЛ	120	80	200
АПЛ в стадии утилизации		2	2
АПЛ ожидают утилизации	3	1	4
Особое решение	1		1
АПЛ с невыгруженным ОЯТ	4	2	6
АПЛ с выгруженным ОЯТ	120	81	201

Реакторные блоки и отсеки	СФ	ТОФ	Всего
Многоотсечные РБ			
В стапеле (в доке)		5	5
На плаву	1	5	6
В пункте изоляции (с ОЯТ)		2	2
Реакторные отсеки			
Сформировано	123	68	191
Размещено в ПДХ	123	68	191

КЛЮЧЕВЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАБОТ

1. Sarkisov A. A., Antipov S. V., Vysotskii V. L., Kobrinskii M. N. et al. Forecast of the Radioecological Consequences of Hypothetical Accidents in Nuclear and Radiation Hazardous Objects Located at the Bottom of the Barents and Kara Seas // Atomic Energy. — 2019, Vol. 125, No. 6, P. 391–399.
2. А. А. Саркисов. К вопросу о ликвидации радиоактивных загрязнений в арктическом регионе // Вестник Российской академии наук. — 2019, Т. 89, № 2, С. 3–20.
3. Саркисов А. А., Сотников В. А., Антипов С. В., Кобринский М. Н., Биладенко В. П. Оптимизация стохастической модели коррозионного разрушения защитных барьеров в морской среде для оперативной

оценки их состояния и имитационного моделирования технических решений // Известия РАН. Энергетика. — 2019, № 4, С. 130–135.

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

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

2.3. БЕЗОПАСНОСТЬ НАСЕЛЕНИЯ

Начиная с середины 1990-х гг. специалисты Института активно участвовали в разработке научных основ, создании и развитии систем мониторинга радиационной обстановки и аварийного реагирования. В настоящее время Институт последовательно развивает методологию сравнительного анализа рисков, которая представляет собой эффективный и научно обоснованный инструмент при разработке рекомендаций для общества и органов государственной власти по реагированию на угрозы радиационного характера. В 2020 году значительное внимание было уделено подготовке 6-го Национального доклада Российской Федерации, приуроченного к 35-й годовщине чернобыльской аварии.

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

В настоящее время научные исследования и практические работы в данной области осуществляет Отделение развития систем аварийной готовности и реагирования ИБРАЭ РАН.



РАЗВИТИЕ СИСТЕМ АВАРИЙНОЙ ГОТОВНОСТИ И РЕАГИРОВАНИЯ

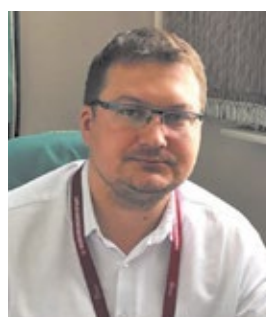


НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ
НАПРАВЛЕНИЯ

Научный руководитель
ИБРАЭ РАН

Л. А. Большов

академик РАН
(bolshov@ibrae.ac.ru)



Заведующий
отделением

С. Н. Красноперов

(rnk@ibrae.ac.ru)

КЛЮЧЕВЫЕ СПЕЦИАЛИСТЫ

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

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

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

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

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

И. Г. Акимова — проектирование архитектуры систем радиационного мониторинга и информационных систем для задач аварийной готовности и реагирования на ЧС с радиационным фактором.

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 С РАДИАЦИОННЫМ ФАКТОРОМ
- 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 2020 ГОДА

1. Внедрение в работу ЦНТП ИБРАЭ РАН современного программного комплекса оценки и прогноза радиационной обстановки СОПРО

В 2020 году в повседневную деятельность ЦНТП ИБРАЭ РАН был внедрен современный программный комплекс моделирования переноса радиоактивных веществ в атмосфере для задач оценки, анализа и прогноза параметров радиационной обстановки (СОПРО). Ключевыми особенностями программного комплекса являются:

- Возможность выполнения расчетов для любой точки мира с использованием детальных фактических и прогнозных метеорологических данных высокого пространственно-временного разрешения, данных о подстилающей поверхности, рельефе местности.

- Кроссплатформенность.
- Использование свободно-распространяемого программного обеспечения с открытым исходным кодом, а также российского программного обеспечения, выбранного Госкорпорацией «Росатом» в качестве базового системного программного обеспечения.
- Поддержка мультиязычности (на данный момент поддерживаются русский и английский языки).
- Переход к облачным технологиям, интерфейс пользователя реализован с использованием современных web-технологий, что позволяет экспертам ЦНТП ИБРАЭ РАН иметь доступ к программному комплексу и выполнять расчеты из любой точки, где есть доступ к сети Интернет.

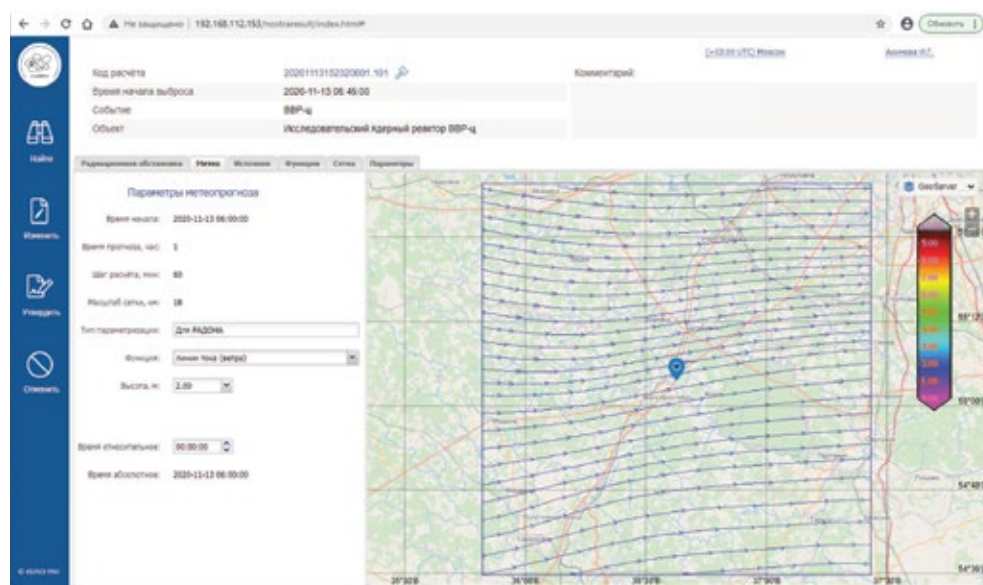


Рисунок 2.3.1. —
Интерфейс пользователя
программного комплекса
СОПРО

- Вычислительное ядро СОПРО основано на современной верифицированной модели атмосферного переноса, адаптированной для работы на кластерных вычислительных системах и сопряженной с численной моделью прогноза погоды.

2. Ансамблевый подход к моделированию переноса радиоактивных веществ в атмосфере

Тяжелые аварии на АЭС — события крайне редкие, в ходе совершенствования технологических систем безопасности их вероятность снижается, однако остается не нулевой. Для задачи поддержки принятия решений на случай возникновения таких аварий должны быть подготовлены инструменты для анализа и прогноза параметров радиационной обстановки. Как показывает анализ аварий согласно ВАБ-2, большинство сценариев сопровождается длительными выбросами в атмосферу (продолжительность — двое суток и более). Также и атмосферные выбросы радиоактивных веществ при авариях на Чернобыльской АЭС в 1986 году и на АЭС «Фукусима-1» в 2011 г. имели длительный характер, что привело к загрязнению прилегающих территорий вокруг АЭС. Такие сценарии в большинстве случаев не могут быть описаны с использованием детерминистических подходов, в которых используются наиболее вероятные прогнозы параметров метеорологической обстановки без учета их неопределенностей. Это связано с хаотической природой атмосферы и ростом дисперсии прогноза метеорологических параметров с увеличением заблаговре-

менности. С учетом этого в 2020 году был разработан и реализован комплексный ансамблевый подход, позволяющий агрегировать в единый анализ неопределенности параметров источника выброса, неопределенности параметров модели атмосферного переноса и ансамбль прогноза метеорологических параметров. Он позволяет:

- проводить многовариантный анализ последствий с учетом набора гипотез с последующим исключением несостоятельных по данным фактических измерений;
- повысить эффективность системы аварийного реагирования с точки зрения оперативности и адресности защитных мероприятий для населения в случае возможных аварий на АЭС;
- повысить точность прогнозирования параметров радиационной обстановки.

При этом данный подход полностью реализован с применением современных возможностей суперкомпьютерных систем, что позволяет проводить расчеты с высоким пространственным разрешением с сохранением оперативности прогнозов.

3. Разработка малогабаритного автономного дозиметра гамма-излучения на основе сцинтилляционного детектора для использования в беспилотном летательном аппарате

В случае возникновения ЧС с радиационным фактором требуется оперативно в онлайн режиме провести измерение характеристик полей гамма-излучения. Для этих целей очень хорошо

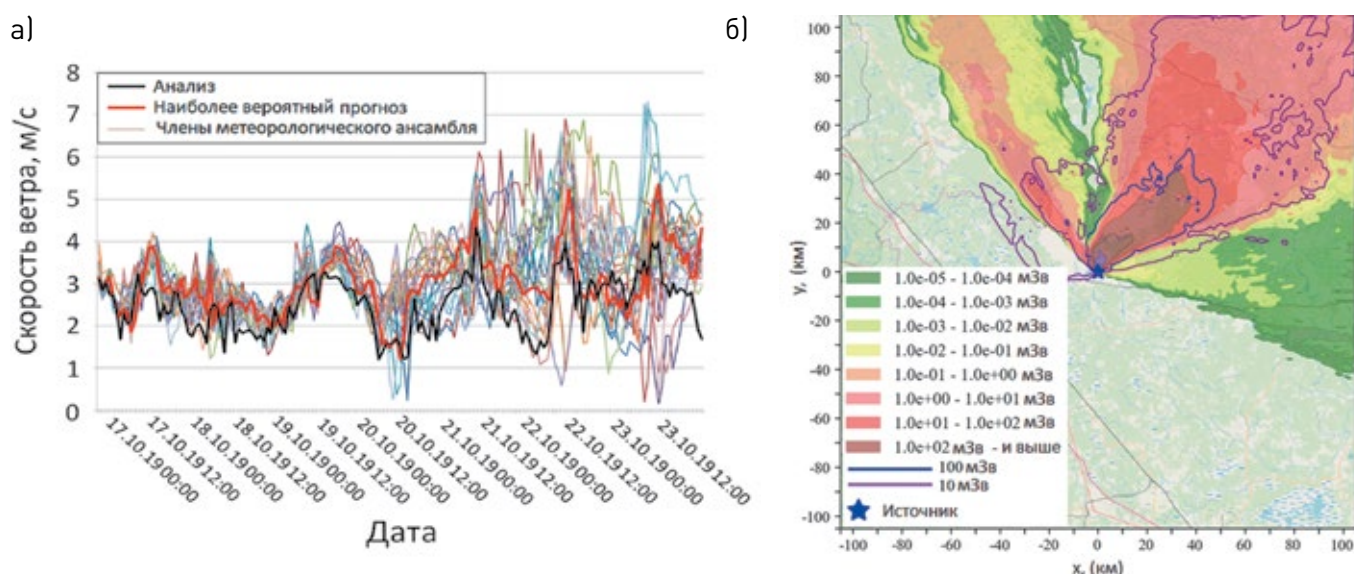


Рисунок 2.3.2 — (а) расчетные значения прогнозов скорости ветра в метеорологическом ансамбле и прогноз по данным анализа в зависимости от заблаговременности в месте расположения гипотетического источника выброса; (б) соответствующие расчетные значения эффективной дозы с учетом неопределенностей — линии уровня и результаты анализа (закрашенные области)



Рисунок 2.3.3 — Перспективный облик дозиметра на подвеске БПЛА

себя зарекомендовали беспилотные летательные аппараты (БПЛА). Однако существует ряд ограничений на использование БПЛА:

- а) по полезной нагрузке (ограничение по массе подвески), т.е. БПЛА не всегда способен поднять требуемую полезную нагрузку;
- б) по обеспечению электропитанием и связью — как правило, у БПЛА отсутствует возможность подключения к бортовой сети БПЛА сторонних устройств.

С целью решения этих инженерно-технических проблем специалистами ИБРАЭ РАН начата разработка малогабаритного автономного дозиметра гамма-излучения (рис. 2.3.3.), ключевыми особенностями которого являются:

- использование сцинтилляционного детектора;
- малая масса — не более 200 грамм;
- наличие собственного источника питания, независимого от бортовой сети БПЛА;
- наличие собственного радиоканала для обеспечения передачи данных измерений в режиме online;
- наличие встроенного GPS/ГЛОНАСС приемника и барометрического датчика высоты;
- наличие специального программного обеспечения, позволяющего выполнять настройки комплекса, получать и обрабатывать данные измерений.

В 2020 году специалистами ИБРАЭ РАН разработана концепция малогабаритного автономного дозиметра гамма-излучения (МАД) для БПЛА, подготовлено техническое задание на проектирование и начаты работы по разработке контроллера для малогабаритного автономного дозиметра гамма-излучения.

4. Создание в составе центра поддержки принятия решений ВНИИ ГОЧС (ФЦ) информационных систем научно-технической поддержки на случай ЧС с радиационным фактором

Целью работы являлось обеспечение центра поддержки принятия решений (ЦППР) ВНИИ ГОЧС (ФЦ) современными программно-техническими инструментами, позволяющими решать следующие основные задачи:

- оценка, анализ, прогноз параметров радиационной обстановки, подготовка рекомендаций по мерам защиты населения и территорий при ЧС с радиационным фактором;
- удаленная оперативная техническая поддержка пользователей созданных систем радиационного контроля и комплексных систем мониторинга состояния защиты населения (КСМ-ЗН);
- организация и проведение дистанционного обучения и повышения квалификации специалистов органов управления РСЧС в области радиационной безопасности, радиационного мониторинга и аварийного реагирования.

В ходе выполнения работ в 2020 году:

- разработаны технический проект и рабочая конструкторская документация;
- проведен анализ результатов эксплуатации и гарантийного обслуживания существующих элементов территориальных систем радиационного контроля и КСМ-ЗН за последние 5 лет. По результатам анализа разработана модель процессов удаленной оперативной технической поддержки, эксплуатации и технического обслуживания территориальных систем радиационного контроля и КСМ-ЗН;
- подготовлены курсы для системы дистанционного обучения;



Рисунок 2.3.6 — Проведение сотрудниками ЦНТП ИБРАЭ РАН радиометрического обследования в районе сооружения участка Юго-Восточной хорды вблизи границ Московского завода полиметаллов

5. Работы специалистов ЦНТП ИБРАЭ РАН по Юго-Восточной хорде

Еще в начале декабря 2019 года жители г. Москвы (район Москворечье-Сабурово) обратились в ИБРАЭ РАН за поддержкой в объективной оценке ситуации, складывающейся в районе железнодорожной платформы Москворечье в связи со строительством Юго-Восточной хорды вблизи границ Московского завода полиметаллов с участками незначительного радиоактивного загрязнения. Предварительный экспертный анализ деятельности предприятия в прошлом и результатов измерений, проведенных в 2019 году, показал, что ситуация не является острой с точки зрения радиационной безопасности населения. Для проверки этого вывода специалистами ИБРАЭ РАН в декабре 2019 года были проведены дозиметрические и спектрометрические измерения, взяты пробы грунта на территории будущего строительства и выполнены расчеты, необходимые для моделирования гипотетического радиационного воздействия на население. Расчетный прогноз доз облучения населения был выполнен для разных вариантов строительных работ на территории и метеорологических сценариев.

В ходе анализа было установлено, что ни один из рассмотренных сценариев не влечет за собой каких-либо угроз для проживающих поблизости людей. Во всех случаях прогнозируемые среднегодовые дозы облучения жителей на $3 \div 5$ математических порядков (в $1000 \div 100000$ раз) меньше основного предела дозы для населения (1 мЗв/год), установленного действующими Нормами радиационной безопасности

НРБ-99/2009. По результатам проведенных работ ИБРАЭ РАН был выпущен препринт, размещенный на официальном сайте Института (<http://www.ibrae.ac.ru/pubtext/333>).

Весной 2020 года силами ФГУП «Радон» были выполнены работы по реабилитации и рекультивации участка территории с радиоактивно загрязненным грунтом.

15 июля 2020 года мобильная группа ЦНТП ИБРАЭ РАН выехала в район сооружения участка Юго-Восточной хорды вблизи границ Московского завода полиметаллов для проведения повторного радиометрического обследования территории после работ, выполненных ФГУП «РАДОН». Все измерения, проведенные мобильной группой ЦНТП ИБРАЭ РАН на данном участке, продемонстрировали, что показания находятся в пределах значений характерного для г. Москвы радиационного фона. Таким образом, радиационные риски для населения, проживающего вблизи обследованного участка, которые и до проведения реабилитационных работ оценивались ИБРАЭ РАН, как пренебрежимо малые, практически отсутствуют.

Также для наблюдения за состоянием этой территории специалистами лаборатории комплексной оценки состояния радиационно опасных объектов ИБРАЭ РАН был применен метод лазерного сканирования местности с применением современного оборудования с разрешением миллиметрового диапазона. Это позволило получить детальную трехмерную картину данной местности, что поможет отслеживать состояние рельефа и его изменения во времени.

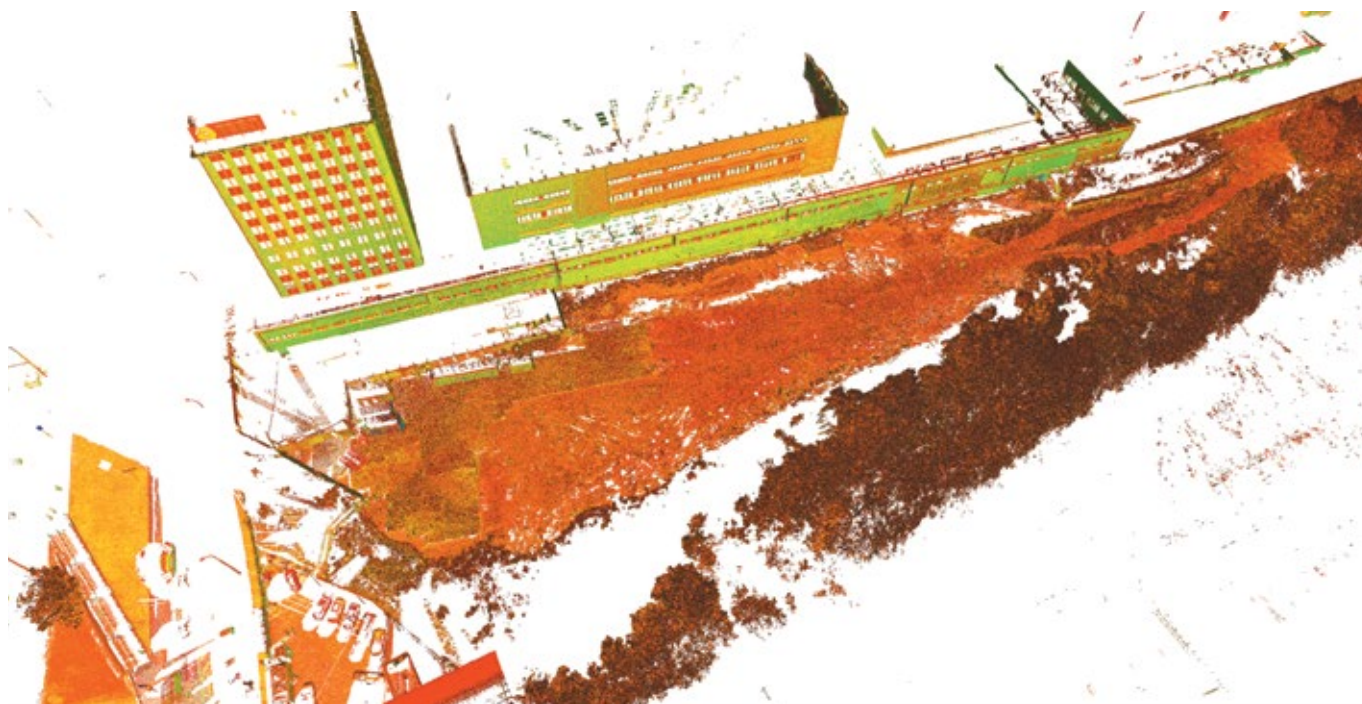


Рисунок 2.3.7 — Изображение территории сооружения участка Юго-Восточной хорды, полученное с помощью лазерного сканирования местности

КЛЮЧЕВЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАБОТ

1. «Issues of Safety Assessment of New Russian NPP Projects in View of Current Requirements for the Probability of a Large Release», A. E. Kiselev, A. A. Kiselev, K. S. Dolganov, D. Yu. Tomashchik, S. N. Krasnoperov (ИБРАЭ РАН, г. Москва), V. B. Morozov, Nuclear Technology, Published online: 02 Aug 2020, <https://doi.org/10.1080/00295450.2020.1767998>.
2. «Application of ensemble method to predict radiation doses from a radioactive release during hypothetical severe accidents at Russian NPP», R. I. Bakin, I. M. Gubenko, K. S. Dolganov, R. Y. Ignatov, E. A. Ilichev, A. A. Kiselev, S. N. Krasnoperov, P. A. Konyaev, K. G. Rubinshtein & D. Y. Tomashchik (ИБРАЭ РАН, г. Москва), Journal of Nuclear Science and Technology, Published online: 15 Dec 2020, <https://doi.org/10.1080/00223131.2020.1854879>.
3. «Оценка потенциальных радиологических рисков населения при реализации проекта «Прорыв» Госкорпорации «Росатом». Часть 2. Определение радиологического ущерба», Иванов В. К., Чекин С. Ю., Меняйло А. Н., Ловачев С. С., Селева Н. Г., Бакин Р. И., Ильичев Е. А., Киселев А. А. (ИБРАЭ РАН, г. Москва), Соломатин В. М., Адамов Е. О., Лемехов В. В., Проухин А. В., «Радиация и риск», Т. 29, № 4, 2020, стр. 48–68, DOI: 10.21870/0131-3878-2020-29-4-48-68.
4. «Experiments on Lightning Detection Network Data Assimilation», Rubinshtein K. G., Gubenko I. M., Ignatov R. Y. (ИБРАЭ РАН, г. Москва), Tikhonenko N. D., Yusupov Y. I., «Atmospheric and Oceanic Optics», Т. 33, № 2, 2020, стр. 219–228, DOI: 10.1134/S1024856020020086.
5. «Численные эксперименты по прогнозу гололедных явлений». Р. Ю. Игнатов, К. Г. Рубинштейн (ИБРАЭ РАН, г. Москва), Ю. И. Юсупов, «Оптика атмосферы и океана», Том 33, № 9 (2020), стр. 735–741, DOI: 10.15372/A0020200911.

2.4. РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ



ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ АЛГОРИТМЫ



**НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ
НАПРАВЛЕНИЯ**

Научный руководитель
ИБРАЭ РАН

Л. А. Большов

академик РАН
(bolshov@ibrae.ac.ru)



Заведующий отделом

В. М. Головизнин

д.ф.-м.н.
(gol@ibrae.ac.ru)

КЛЮЧЕВЫЕ СПЕЦИАЛИСТЫ

Д. Н. Токарчук — заместитель заведующего отделом;

О. С. Сорокикова, д.ф.-м.н. — суперкомпьютерное моделирование и ПК;

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

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

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

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

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

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

Д. В. Дзама — моделирование течений в водных акваториях разного масштаба и динамики примеси.

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

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

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

2 РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ:

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

ОСНОВНЫЕ ИТОГИ 2020 ГОДА

1. Обеспечение водородной взрывобезопасности

На основе вычислительной методики КАБАРЕ разработан алгоритм для многомасштабного моделирования задачи об истечении через отверстие малого диаметра водородосодержащей газовой смеси из сосуда высокого давления. В нем заложены две идеи: (1) — применение сжимаемой модели газовой смеси для моделирования «быстрых» ударно-волновых процессов в ближнем поле струи, занимающего относительно малую часть от расчетной области, и слабосжимаемого приближения для моделирования «медленного» турбулентного перемешивания в дальнем поле струи. На интерфейсе между моделями предложен метод «сшивки» решений, обеспечивающий устойчивость решения и выполнение законов сохранения массы компонент смеси и энергии; (2) — применение метода асинхронного интегрирования по времени уравнений газовой динамики.

На рис. 2.4.1 приведены результаты расчета горизонтальной струи водорода из сосуда с давлением 100 бар через отверстие диаметром 1 мм.

На основе вычислительного подхода КАБАРЕ разработан программный код для численного моделирования крупномасштабного горения перемешанных водородосодержащих смесей с однородным и неоднородным составом. С помощью данного кода выполнено моделирование эксперимента по ускоренному горению 13% сухой водородно-воздушной смеси при нормальных условиях, ранее проведенного на установке ENACCEF. Расчеты, проведенные на сетках различной мелкости разбиения, воспроизводят экспериментальные характеристики пламени — развитие скорости фронта пламени вдоль высоты установки и амплитуду ударной волны, создаваемой ускоряющимся пламенем (рис. 2.4.2). Характер развития фронта пламени в расчете на подробной сетке представлен на рис. 2.4.3.

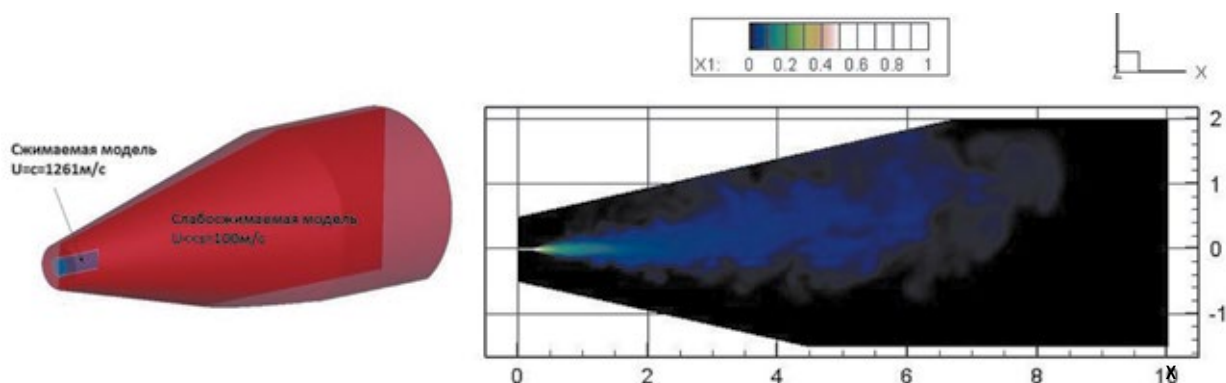


Рисунок 2.4.1 — Расчет истечения водорода из сосуда с давлением 100 бар через отверстие диаметром 1 мм

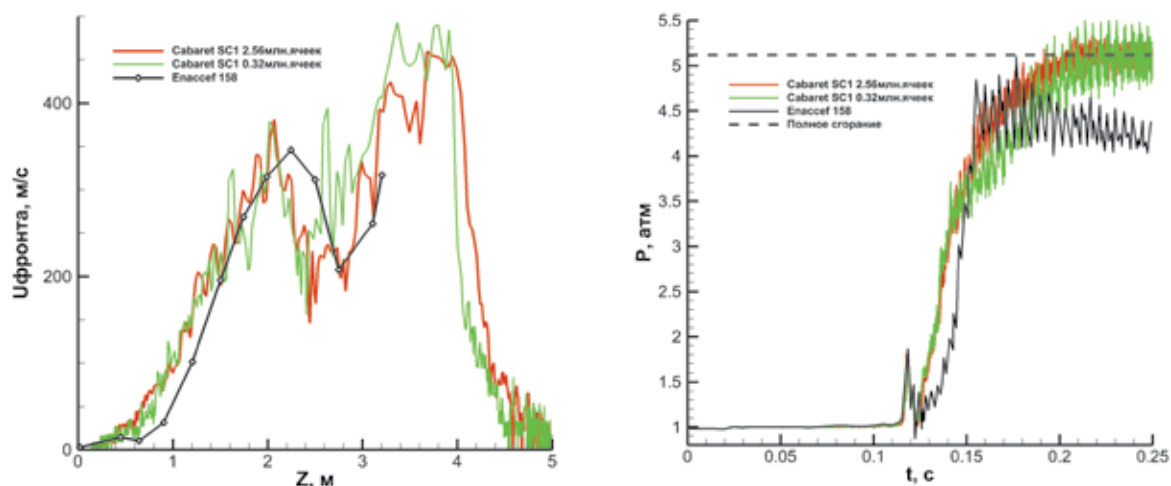


Рисунок 2.4.2 — Эволюция скорости фронта пламени вдоль высоты установки ENACCEF (слева) и показание датчика давления на высоте 3.015 метра (справа) в эксперименте и расчетах

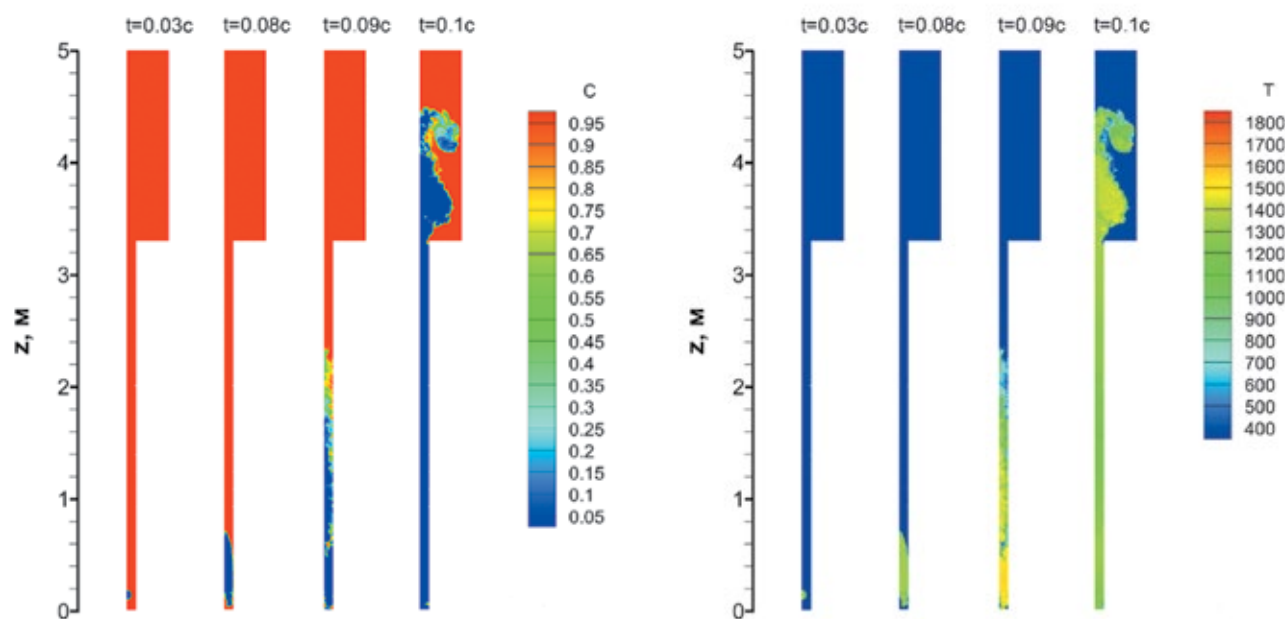


Рисунок 2.4.3 — Развитие полей степени сгорания смеси (слева) и температуры газа (справа) в различные моменты времени для расчета на подробной сетке

2. Влияние динамики внутренних волн на перенос радионуклидов в прибрежных водах

Разработана новая вычислительная методика расчета течений стратифицированной жидкости со свободной поверхностью в поле сил тяжести на основе схемы КАБАРЕ.

Разработана компьютерная программа, реализующая новую методику в случае двух пространственных измерений, проведена ее верификация на тестовых задачах и кросс-верификация на модельной задаче о схлопывании однородного по плотности пятна в стратифицированной жидкости. Сравнение проводилось с результатами расчетов по методике МЕРАНЖ, разработанной в ИАП РАН, и с аналитическим решением, адекватно описывающим начальные этапы процесса. Показано, что новая модель хорошо описывает все три этапа развития динамики схлопывания однородного по плотности пятна в толще стратифицированной среды: это быстрый рост в горизонтальном направлении, затем постепенное уменьшение вертикального размера пятна и, на третьем этапе — медленное схлопывание пятна до полного исчезновения. Графики зависимостей вертикального и горизонтального размеров по двум методам (МЕРАНЖ, КАБАРЕ) [3] согласуются с аналитическим решением в первых двух этапах схлопывания.

Новая методика и программный комплекс предназначены для моделирования динамики внутренних волн с последующей их турбулизацией в прибрежных зонах и изучения влияния

этих процессов на перенос радиоактивных загрязнений.

3. Разработка методологии решения уравнений гиперболического типа при наличии больших градиентов и ее использование в задачах переноса радионуклидов в водных средах

Разработан программный комплекс CADAM (Complex Assessment of Radioactive Discharges in Aquatic Medium) для математического моделирования переноса радиоактивных загрязнений стоками поверхностных вод в районах расположения радиационно опасных объектов с учетом особенностей рельефа местности. Комплекс предназначен для поддержки принятия решений при угрозе радиационных аварий и возникновении нештатных ситуаций, связанных с внезапными паводками и полным или частичным разрушением гидротехнических сооружений. Может использоваться для обоснования безопасности объектов, с учетом их 3D особенностей и факторов радиационного риска. **Отличительной чертой комплекса CADAM является его робастность (надежность предсказаний при расчетах различных режимов течений) и высокая степень детализации расчетов.** В основу математической модели комплекса положены уравнения Сен-Венана, вычислительного алгоритма — схема КАБАРЕ.

В программном комплексе CADAM реализована версия хорошо сбалансированного (well-balance) численного алгоритма интегрирования

гидродинамического блока. Эта версия была апробирована на задаче моделирования пропускной способности запорного устройства обводного канала Теченского каскада водоемов (ТКВ) с учетом детальной 3D модели конструкции запорных устройств. Некоторые элементы конструкции запорных устройств наклонены под большим углом. Этот факт сильно влияет на их пропускную способность. Поэтому была учтена смачиваемость наклонных областей при динамическом изменении уровня воды. **Такого класса задача нами была решена впервые.**

Существенно расширена матрица верификации для задач с двумерными и трехмерными геометриями расчетных областей. Был рассмотрен ряд тестов, позволяющих проверить точность и робастность гидродинамического модуля с учетом особенностей различных режимов течения, топографии, начальных и граничных условий. Для случаев изменчивости береговой линии, наличия дополнительного поступления влаги (например, во время дождя), произвольного дна, разных режимов течения, в том числе, гидродинамических скачков, разных граничных условий проанализирована чувствительность результатов к выбору различных параметризаций начальной скорости влечения и потока влекаемых наносов.

Разработанный программный комплекс ориентирован на водные объекты различных мас-

штабов, от водосбросных сооружений до полного Теченского каскада водоемов и крупных морских акваторий, и снабжен дружелюбным графическим интерфейсом пользователя.

На рис. 2.4.4 показана 3D модель запорных устройств в обводном канале Теченского каскада водоемов с выводом результата моделирования их пропускной способности в выбранном режиме работы в зависимости от напора воды в канале.

В рамках развития РПК CADAM разработаны полностью трехмерная распараллеленная модель и расчетный код для оценки последствий выброса радиоактивных материалов в крупных водных акваториях методом лагранжевых крупных частиц с использованием сторонних данных по течениям (**MSTOK3D**). Реализован многовариантный подход к моделированию длительных выбросов, позволяющий для каждой точки определить максимально возможные значения концентрации радиоактивности с заданным уровнем доверия. Этот подход предполагает проведение расчетов с различными моментами начала выброса, при которых реализуются разные сценарии изменчивости течений (рис. 2.4.5). **Для атмосферных процессов такой подход реализован в Финляндии и в ИБРАЭ РАН. Для больших водных акваторий — во Франции.**

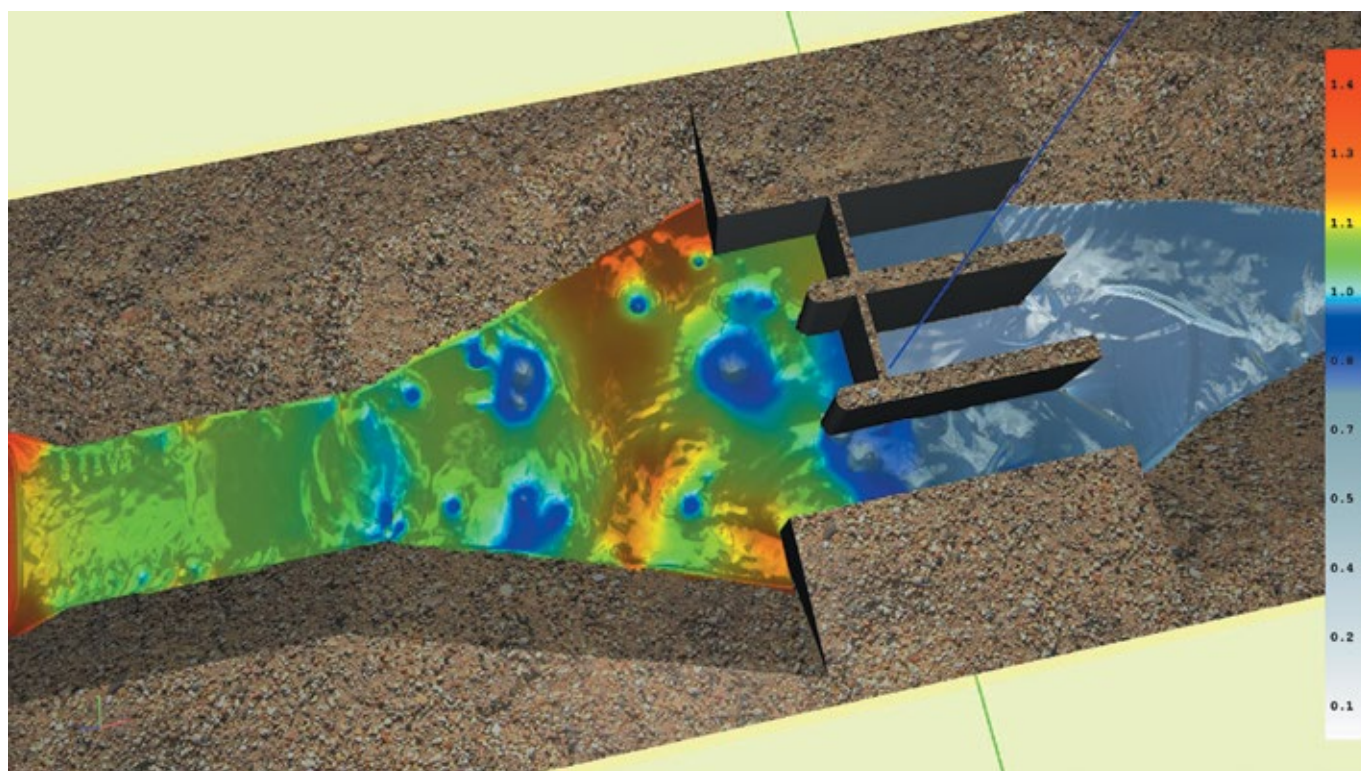


Рисунок 2.4.4 — Пример вывода результата моделирования течения в запорных устройствах обводных каналов ТКВ

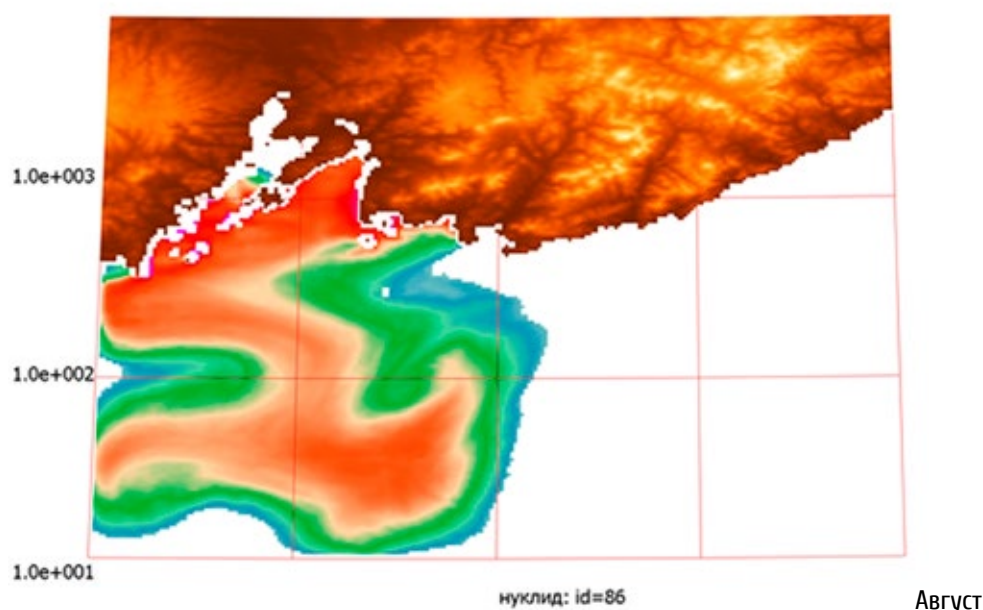


Рисунок 2.4.5 — Использование ансамблевого подхода для определения вероятностной картины радиоактивного загрязнения в случае гипотетического выброса в Дальневосточном регионе

4. Разработка октосеток для задач водородной безопасности

В последние несколько лет в ИБРАЭ РАН развивается код моделирования течения многокомпонентных газовых смесей, основанный на методе КАБАРЕ. Данный код распараллелен с использованием асинхронных MPI операций обмена и использует криволинейные неструктурированные гексагональные сетки. Кроме уравнений газовой динамики, учитываются и другие физические процессы — теплопроводность, вязкость, диффузия и пр. Актуальной является задача ускорения данного кода.

Одним из подходов к кратному ускорению кода мог бы стать переход от криволинейных неструктурированных сеток к октосеткам. Октосетки, двойственные октодеревьям, являются хорошим компромиссом между преимуществами параллелепипедных сеток и необходимостью сгущения сеток в заранее выбранной подобласти. Перевод кода на использование таких сеток требует решения следующих задач:

- построение октосеток в областях сложной структуры, задаваемых набором поверхностей (например, в STL-формате), с требуемым измельчением в областях, привязанных к упомянутым поверхностям и/или задаваемым геометрическими характеристиками;
- выделение граней ячеек, соответствующих наружным или внутренним поверхностям, с целью постановки на них нужных граничных условий;

- загрузка таких сеток вместе с параметрами, привязанными к геометрическим объектам, в MPI-распараллеленный код;
- эффективное использование октосеток при численном моделировании, что означает эффективное использование информации о соседстве ячеек, граней и узлов. Особое внимание уделяется обработке граней, находящихся на стыке подобластей с разной степенью измельчения;
- для всех классов геометрических объектов необходимо эффективно решить вопросы синхронизации информации между вычислительными партициями.

На рис. 2.4.6 приведен пример октосетки и данных на ней на некоторый момент времени моделирования истечения водорода в резервуар (тест H_2P_0). Реализовано распараллеливание на 256 потоков. Текущее достигнутое ускорение составляет около 2.5. Требуется дальнейшее исследование влияния «ступенчатых» границ на результаты моделирования. Также в случае принятия октосеток к использованию, планируется ввести асинхронность шагов моделирования с тем, чтобы шаги по времени в крупных ячейках не были равны шагам в ячейках максимального уровня измельчения.

5. Проведение связанных расчетов «нейтроника-теплогидравлика»

Разработана прецизионная модель накопления легких газообразных продуктов деления в об-

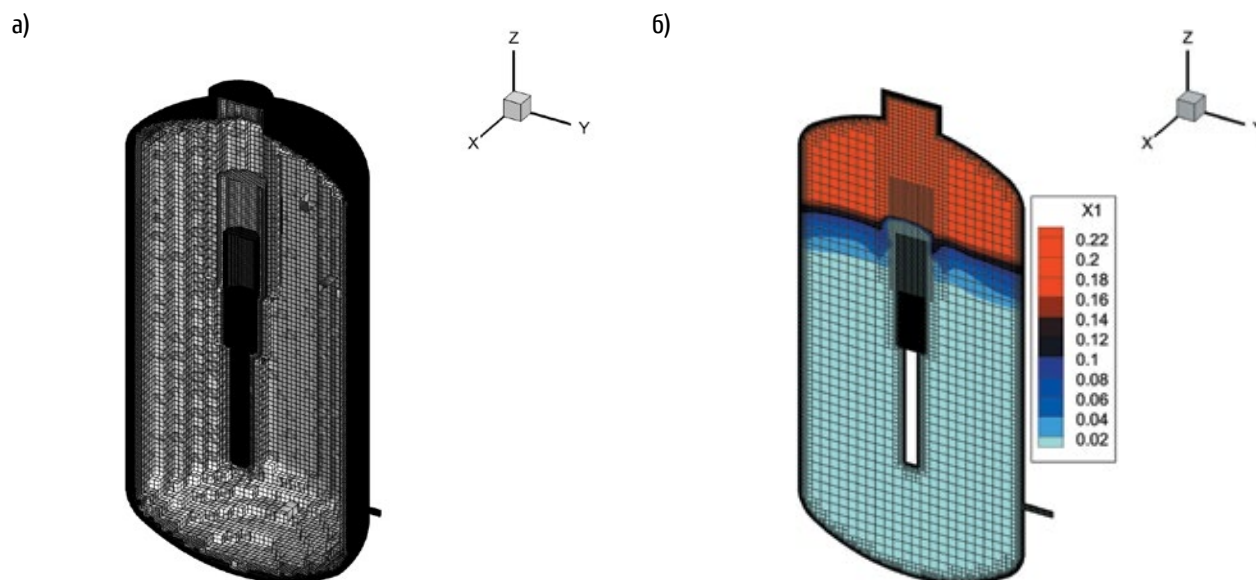


Рисунок 2.4.6 — Октосетка (а) и моделирование концентрации водорода (б)

лученном ядерном топливе с расширенным набором нуклидов и дополнительными нейтронными реакциями в цепочках переходов. Она может быть использована при решении задач ядерной и радиационной безопасности и повышения эффективности проведения работ с отработавшим ядерным топливом.

Совместно со специалистами МГТУ им. Н. Э. Баумана для задач нуклидной кинетики получены решения с гарантированной точностью для всех

элементов сверхжестких систем обыкновенных дифференциальных уравнений большой размерности. Показано, что для получения гарантированно точного решения таких систем с приемлемыми затратами следует использовать алгоритм итерационного уточнения с вычислением правой части с повышенной разрядностью. Полученные результаты могут быть использованы для получения реперных значений в задачах нуклидной кинетики.

КЛЮЧЕВЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАБОТ

1. Tolias I. C., Kanaev A. A., Koutsourakis N., Glotov V. Y., Venetsanos A. G. Large Eddy Simulation of low Reynolds number turbulent hydrogen jets — Modelling considerations and comparison with detailed experiments // *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.10.008.

2. Bol'shov L. A., Glotov V. Yu., Goloviznin V. M., Kanaev A. A., Kiselev A. E., Yudina T. A. Cabaret-ScI Code Validation in Experiments on Hydrogen Explosion Safety at NPP, Cabaret-ScI Code Validation in Experiments on Hydrogen Explosion Safety at NPP. // *Atomic Energy*, Feb. 2020, — Vol. 127. — No. 4. — P. 216–222.

3. Gushchin V. A., Kondakov V. G. (2020) One Approach of Solving Tasks in the Presence of Free Surface Using a Multiprocessor Computing Systems. // In: Lirkov I., Margenov S. (eds) *Large-Scale Scientific Computing*.

LSSC 2019. *Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 11958. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-41032-2_37.

4. Блохин А. И., Митенкова Е. Ф., Новиков Н. В. Эффект использования NJOY и GRUCON при подготовке ядерных данных для нуклидов стали. // *Атомная Энергия*, 2020. — Т. 128. — Вып. 3. — С. 158–162.

5. Маничев В. Б., Митенкова Е. Ф., Фельдман Э. О., Кожевников Д. Ю., Соловьева Е. В. Достоверность и точность решения задач нуклидной кинетики // *Информационные технологии*, 2020. — Т. 26. — № 4. — С. 231–238.

6. Глотов В. Ю., Головизнин В. М., Четверушкин Б. Н. Балансно-характеристические разностные схемы для уравнений параболического типа. // *Математическое моделирование*, 2020. — Т. 32. — № 4. — С. 94–106.



ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА



Директор
ИБРАЭ РАН

Л. В. Матвеев

д.ф.-м.н.

(matweev@ibrae.ac.ru)



Заведующий
лабораторией

П. С. Кондратенко

д.ф.-м.н.

(kondrat@ibrae.ac.ru)

КЛЮЧЕВЫЕ СПЕЦИАЛИСТЫ

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

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

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

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

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

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

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

ОСНОВНЫЕ ИТОГИ 2020 ГОДА

1. Неклассические процессы переноса

Разработан код 2-Porous+Coll, предназначенный для численного моделирования неклассических процессов переноса радионуклидов в резко контрастных средах в модели двупористой среды при переносе по направлению течения воды в канале адвекции с учетом возможного ускорения переноса за счет коллоидов. Верификация кода проводилась на полученных авторами асимптотических решениях для концентрации и ее степенных моментов.

На основе разработанного ранее асимптотического подхода (метода эйконала) создан численный модуль для расчета неклассических процессов переноса примеси в средах с переменными в пространстве параметрами. Верификация модуля, проведенная на прямых численных расчетах в 1D- и 2D-геометрии, продемонстрировала высокую точность результатов, полученных с использованием созданного модуля, и показала, что время, требуемое для расчета методом эйконала, в среднем приблизительно на два порядка меньше времени прямого численного расчета.

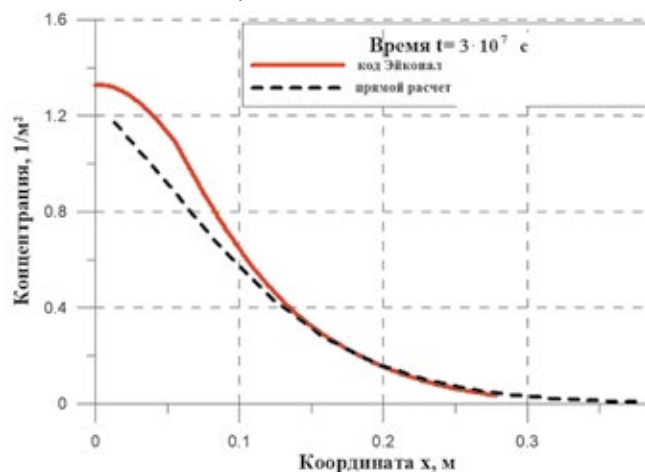


Рисунок 2.4.7 — Пространственные зависимости концентрации примеси, полученные путем применения численного кода (базирующегося на эйкональном подходе) и на основе прямого численного расчета

Построена модель переноса примеси на фоне тепловой конвекции в резко контрастных двупористых средах. В ее основу положены уравнения баланса массы, энергии и количества примеси. Учтены эффекты диффузии и адвекции примеси, теплопроводности, а также обмен энергией и примесью между сильно и слабо-

проницаемой подсистемами двупористой среды. Принята во внимание возможность зависимостей пористости среды от температуры и плотности жидкости от температуры, давления и концентрации примеси.

Разработана модель переноса загрязнений в геологической среде в присутствии сорбирующего барьера, предназначенного для очистки грунтовых вод. С учетом возможных эффектов обтекания барьера загрязненными грунтовыми водами и перерастворения загрязнений в фильтрующиеся воды получены оценки оптимальных параметров барьера, обеспечивающих условия наибольшей эффективности его действия. Показано, что при использовании в барьере материала, обладающего двупористой структурой, эффективность его может быть значительно повышена.

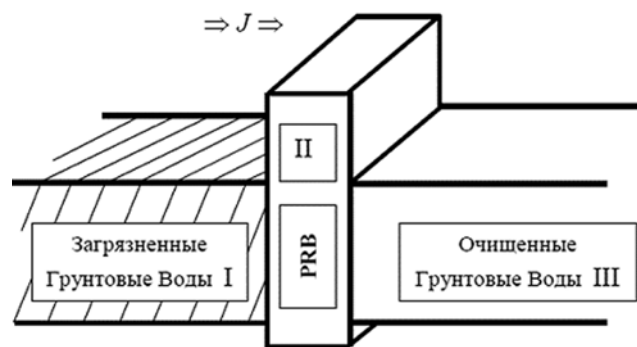


Рисунок 2.4.8 — Плоский однородный барьер в среде с загрязненной областью

2. Математическая модель процесса «самопогружения» движущегося неоднородного источника тепла в геологических средах галитов с учетом наличия газо-жидкостных включений

Изоляция радиоактивных отходов (РАО) и отработанного ядерного топлива (ОЯТ) методом самопогружения в галитах имеет специфику, обусловленную наличием газо-жидкостных включений. Эти включения могут мигрировать в поле градиента температуры к источнику тепла. При достаточном количестве этих пузырьков в зоне расплава может образоваться паро-газовая смесь, существенно влияющая на гидродинамику и теплообмен, с одной стороны, и коррозии капсул с РАО — с другой.

Разработана кинетическая модель эволюции газо-жидкостных включений в галитах с учетом

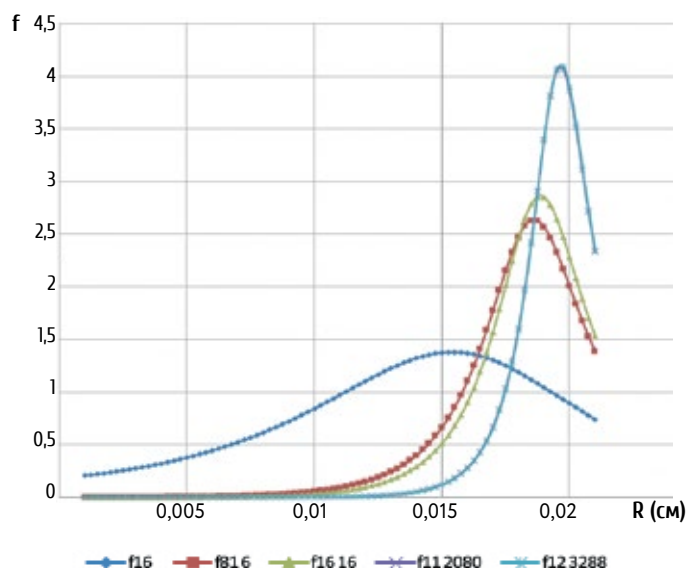


Рисунок 2.4.9 — Функция распределения газожидкостных включений по размерам в различные моменты времени

коалесценции и мгновенного равновероятностного бинарного распада в стационарном периоде термомиграции. Разработана и зарегистрирована соответствующая программа.

Проведены оценки основных характеристик: скорости миграции пузырьков в монокристаллах; критического размера пузырьков и, как следствие, критического размера кластеров; доли пузырьков, которые попадут в полость хранилища, создавая тем самым агрессивную среду, или в зону расплава.

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

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

Исследованы статус и значение вспомогательного условия в построенной ранее теоретической модели релятивистской частицы с внутренними степенями свободы, движущейся во внешних классических полях произвольной физической природы. Два альтернативных условия Тульчиева и Коринальдези применимы для исследования динамики протяженных пробных тел, в то время как условие Френкеля представляется адекватным для точечных частиц со спином. Установлена связь между 4-скоростью и 4-импульсом частицы для условия Френкеля, с помощью которого впервые самосогласованным образом учтен вклад силы Матиссона в уравнения движения спиновой пробной частицы.

Изучены возможные наблюдательные эффекты вращательных и вихревых движений на космологических масштабах, когда в гидродинамическом приближении динамика материи описывается как эволюция сплошной среды, элементами которой являются галактики и кластеры галактик. С этой целью были разработаны программные алгоритмы и написаны приложения, с помощью которых проанализированы современные электронные каталоги астрофизических объектов RCSED, Kuminiski & Shamir, GAIA DR2, MILLIQUAS, KQCG. Найдены возможные наблюдательные проявления глобального космологического вращения, при этом показано, что требуется более аккуратный статистический анализ полученных результатов, желательно с более полными электронными базами данных.

Исследована фундаментальная роль спина как нётерова тока в калибровочных гравитационных моделях для групп Пуанкаре и трансляций. Доказана обобщенная теорема Биркгофа для широких классов калибровочных моделей янг-миллсовского типа с квадратичными лагранжианами, которые включают как P -четный, так и P -нечетный сектор. Найдены ограничения на константы связи, выделяющие семейства теорий, в которых обобщенная теорема Биркгофа выполняется. Установлено, что общая теория относительности может быть последовательным образом интерпретирована как модель калибровочной гравитации Пуанкаре при условии, что лагранжиан имеет специальную форму с фиксированными значениями констант связи, а материя взаимодействует неминимально с гравитационным полем, так что полный тензор спина обращается в нуль.

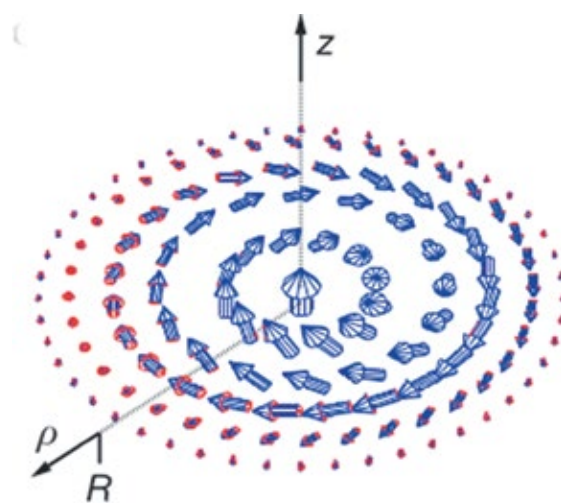


Рисунок 2.4.10 — Скирмион как частице-подобная топологически устойчивая спиновая конфигурация. Намагниченность имеет максимальный модуль m на оси скирмиона, $\rho = 0$, и равна нулю на границе ячейки R

Разработаны новые способы манипулирования динамикой спиновых скирмионов (рис. 2.4.10) в рамках формализма многочастичной квантовой гидродинамики, где межскирмионные диполь-дипольные взаимодействия рассматриваются в приближении точечных скирмионов при наличии градиентов электрического и магнитного полей. Показано, что динамикой скирмионов можно управлять, используя скрещенные градиенты магнитного и электрического полей, что интерпретируется как магнитоэлектрический эффект Холла (рис. 2.4.11). Исследованы волновые процессы в системе скирмионов в скрещенных неоднородных электрическом и магнитном полях и предсказано возникновение нового типа поляризационных волн в жестком скирмионном газе с диполь-дипольным взаимодействием.

Установлена возможность получения фантомных изображений посредством экстремально-го ультрафиолетового (XUV) излучения от лазера на свободных электронах (FEL). Это один из перспективных методов изучения объектов, прямое наблюдение которых затруднено их чувствительностью к воздействию фотонами и требуется создание максимально щадящих условий. Для проведения такого эксперимента на источнике FLASH каждый импульс рентгеновского XUV излучения пропусклся через движущийся диффузор, создававший некоррелированный пучок, который затем разделялся

на две идентичные ветви с помощью введения светоделителя в виде пропускающей решетки (схема эксперимента приведена на рис. 2.4.12). В одном из лучей помещался образец. Была показана возможность формирования фантомного изображения во втором луче, который никогда не взаимодействовал с образцом.

4. Расчет сечений процессов и спектров флуоресценции заряженных фуллеренов

Создана численная программа, позволяющая рассчитывать сечения процессов и спектры флуоресценции при падении электронного пучка или излучения на газ из фуллеренов или их ионов. Программа использует весь набор электронных волновых функций, полученных по кодам QuantumEspresso, ORCA и VASP. Коды QuantumEspresso, ORCA и VASP), включая стационарную и нестационарную опцию функционала электронной плотности, позволили получить энергетические уровни и вид волновых функций для нейтрального фуллерена C_{60} и его ионов C_{60}^{+z} .

Получены результаты расчетов сечений различных процессов с участием нейтральной молекулы фуллерена (или ее иона) при ее взаимодействии с потоком электронов или фотонов. Сечения взаимодействия включают в себя сечения неупругого рассеяния электронов на фуллерене, сечения возбуждения и ионизации фуллерена и его ионов электронным ударом,

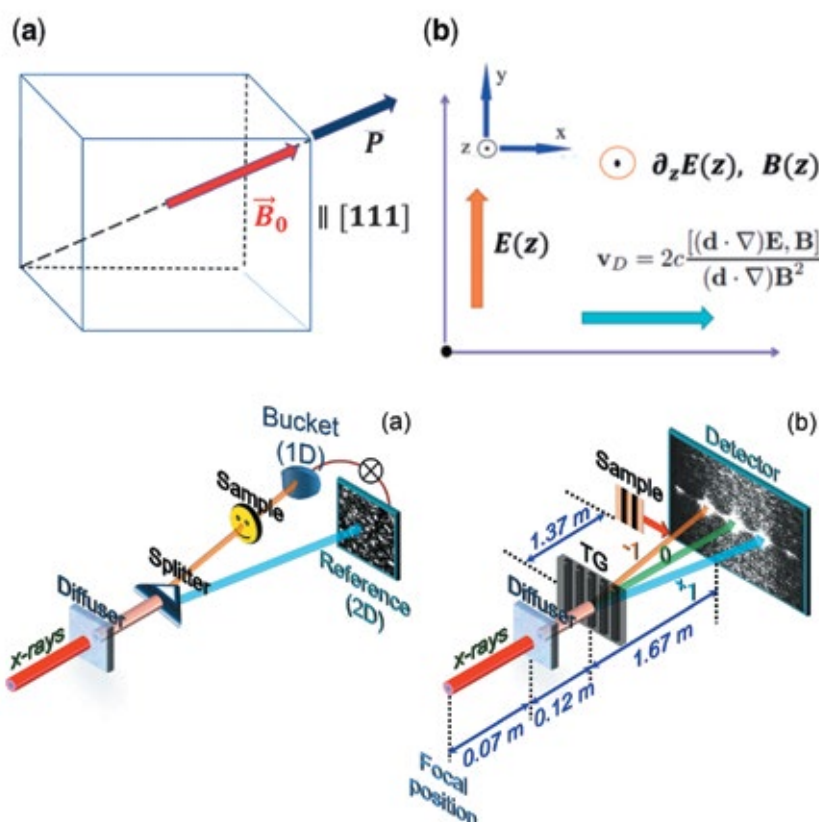


Рисунок 2.4.11 – (а) Магнитно-индуцированная электрическая поляризация Р кристалла скирмиона под управлением магнитного поля $B_0 \parallel [111]$, которая перпендикулярна решетке скирмионов; (б) Направление и скорость дрейфового движения скирмионов в скрещенных неоднородных электрическом и магнитном полях. Схематически изображено, как скирмион совершает холловское движение в скрещенных градиентах электрического и магнитного полей

Рисунок 2.4.12 – (а) концептуальный план эксперимента по созданию фантомных изображений; (б) установка, используемая на FEL источнике FLASH для получения фантомных изображений с помощью XUV луча

сечения фотоионизации и фотопоглощения фуллерена, а также сечения захвата электрона нейтральным фуллереном и ионом фуллерена.

Для нейтральной молекулы C_{60} и всех ее ионов еще раз подтверждено, что наряду с обычными локализованными вблизи сферы фуллерена электронными уровнями (ПЛЭУ) в ионах фуллерена существуют объемно-локализованные уровни (ОЛЭУ).

Рассчитанные спектры флуоресценции при падении электронного пучка на газ из фуллеренов и его ионов показывают, что ожидается спектр в диапазоне энергий $1,5 \div 11$ эВ или в диапазоне длин волн $150 \div 2000$ нм. Показано, что с ро-

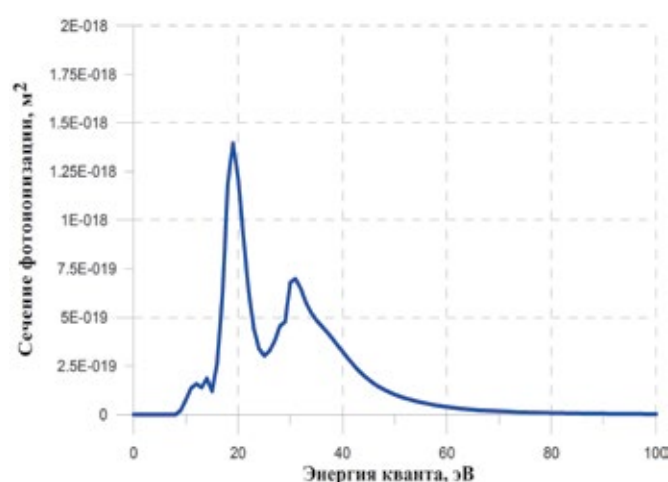


Рисунок 2.4.13 — Расчетная зависимость сечения фотоионизации C_{60} , полученная с использованием волновых функций из расчета по коду ORCA

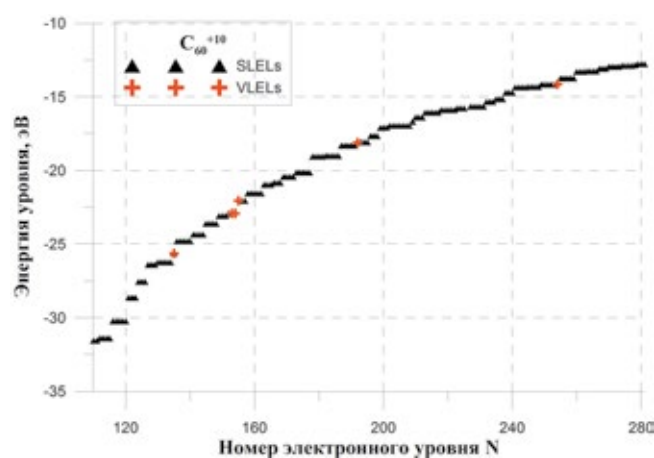


Рисунок 2.4.15 — Энергии электронных уровней иона C_{60}^{+10} в зависимости от номера уровня, полученные с использованием волновых функций из расчета по коду QuantumEspresso. Красным цветом выделены объемно-локализованные электронные уровни (ОЛЭУ)

стом степени ионизации фуллерена спектры становятся шире и разнообразнее, что связано главным образом с ростом числа свободных уровней в системе. Полученные данные уточняют основные параметры газа фуллеренов и его ионов и применимы при выполнении планируемых экспериментов по исследованию спектров флуоресценции паров фуллеренов и их ионов.

5. Новый подход к связи элементарных частиц с гравитацией

Впервые показано, что:

- (I) **гравитационное поле частицы** со спином описывается регуляризованным решением

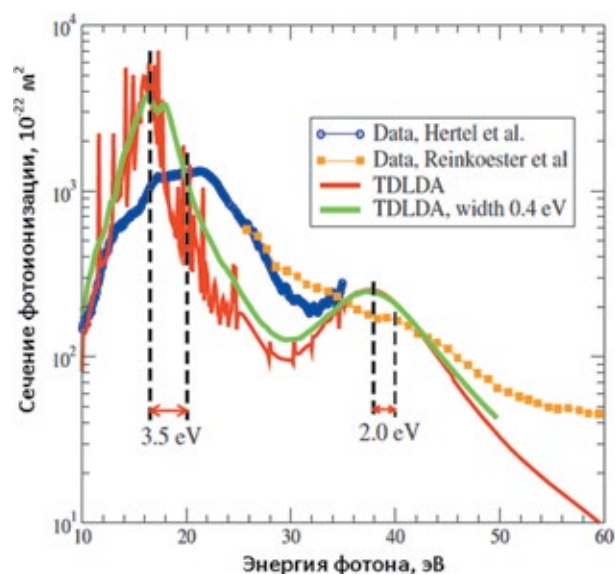


Рисунок 2.4.14 — Расчетные и экспериментальные данные для зависимости сечения фотоионизации C_{60} из работы: Weaver J.H., Martins J.L., Komeda T., et al. Electronic structure of solid C_{60} : Experiment and theory // Phys. Rev. Lett. – 1991. – Vol. 66. – P. 1741–1744.

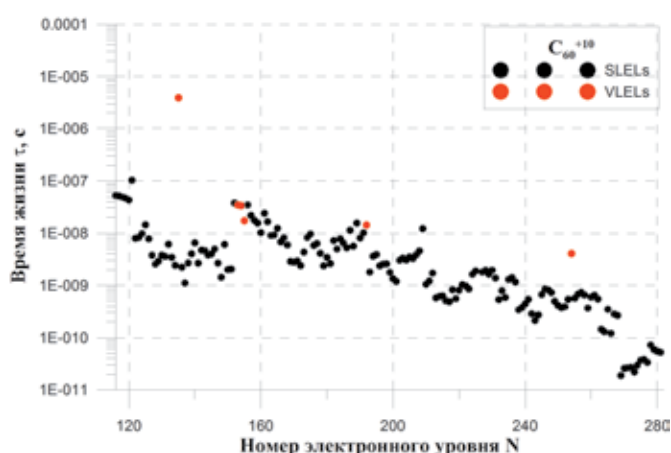


Рисунок 2.4.16 — Времена жизни электронных уровней иона C_{60}^{+10} в зависимости от номера уровня, полученные с использованием волновых функций из расчета по коду QuantumEspresso. Красным цветом выделены объемно-локализованные электронные уровни (ОЛЭУ)

Керра-Ньюмена, которое искривляет пространство на масштабе Комптона, что увеличивает зону влияния гравитации примерно на 22 порядка;

- **(II) суперсимметричная модель Хиггса** (модель Ландау-Гинзбурга) устраняет конфликт гравитации с квантовой теорией, не требуя изменений в уравнениях Эйнштейна;
- **(III) регуляризованная модель электрона** формируется в виде сверхпроводящего диска — мешка с полем Хиггса в состоянии суперсимметричного вакуума;
- **(IV) координаты Керра-Шильда** являются исключительными, поскольку в этих координатах линеаризуются уравнения Дирака и Максвелла на гравитационном фоне;
- **(V) петля Вильсона**, образованная гравитационным затягиванием поля векторного потенциала $A(x)$, дает важный нелинейный вклад в энергию электрона;
- **(VI) уравнения Дирака** принимают струнную форму и динамика электрона соответствует динамике релятивистской струны, что при переходе к представлению Шредингера согласуется с экспериментальными данными о точности электрона. Интерпретация элементарной частицы как черной дыры (ЧД) предлагает новый взгляд на всю проблему структуры элементарных частиц, позволяя построить непертурбативную полевую модель электрона, совместимую с базовыми принципами квантовой теории.

6. Исследования на стыке низкоэнергетической ядерной физики, физики высокотемпературной плотной лазерной плазмы, квантовой оптики и метрологии для разработки нового стандарта времени и частоты на базе низкоэнергетического перехода в ядре ^{229}Th

Критически важная для исследований часового оптического перехода в ядре ^{229}Th проблема эффективного нерезонансного возбуждения аномально низколежащего изомерного состояния $3/2^+ (8.10 \pm 0.17 \text{ эВ})$ решается пропусканием электрического тока через образец, содержащий ядра ^{229}Th . Сечения неупругого рассеяния электронов сверхнизких энергий на атомах ^{229}Th и низкозарядных ионах $^{229}\text{Th}^{1+,4+}$ достигают значений, обеспечивающих необходимый выход изомера. Это открывает новые возможности для разработки источника ядерного когерентного излучения в диапазоне вакуумного ультрафиолета, ядерного светодиода и ядерного стандарта времени и частоты на базе ^{229}Th . Обратный

процесс — передача энергии от возбужденного ядра электрону непрерывного спектра — также имеет относительно большое сечение. Как следствие, девозбуждение ядерного изомера $^{229\text{m}}\text{Th}$ в металле через электроны проводимости будет происходить за характерное время порядка 10^{-6} с , что совпадает с новыми экспериментальными данными по распаду $^{229\text{m}}\text{Th}$ в сверхпроводнике.

Исследован процесс распада ядерного изомера $^{229\text{m}}\text{Th} (3/2^+, 8.10 \pm 0.17 \text{ эВ})$ в анионе тория (Th^-). Комплекс $^{229\text{m}}\text{Th}^-$ — единственный и уникальный в своем роде объект, на котором возможно наблюдение внутренней электронной конверсии на валентных электронах. Показано, что период полупасада изомера через электроны основного $(6d)^3(7s)^2$ и возбужденного $(6d)^2(7s)^2(7p)^1$ состояний аниона тория примерно в 1.5 и 1.1 раз больше, чем через основное состояние $(6d)^2(7s)^2$ атома тория. Таким образом, вероятность внутренней электронной конверсии изомера $^{229\text{m}}\text{Th} (3/2^+, 8.10 \pm 0.17 \text{ эВ})$ в анионе тория уменьшается, несмотря на появление дополнительного валентного электрона в $6d$ или $7s$ состояниях. Этот контринтуитивный результат является следствием уменьшения амплитуд $6d$ и $7s$ волновых функций в окрестности ядра благодаря росту их диффузности из-за появления дополнительного электрона.

Изучена природа химической связи атомов тория с кольцом из шести атомов углерода (шестиугольником) в новых углеродных материалах. Проведенные *ab initio* (на уровне Хартри-Фока с поправкой на возмущение второго порядка [MP2], учитывающей ван-дер-ваальсовы взаимодействия) расчеты металлофуллеренов $\text{Th}@C_{60}$ и $\text{Th}@C_{20}$ показывают, что основное состояние Th является синглетным, а энергии связи орбитальных электронов в этих молекулах превышают энергию изомерного состояния в ядре ^{229}Th , и внутренняя электронная конверсия для низколежащего изомера $^{229\text{m}}\text{Th} (3/2^+, 8.10 \pm 0.17 \text{ эВ})$ запрещена. Оптимальным положением атома тория является позиция, где он обращен к центру шестиугольника и находится на расстоянии 2.01—2.07 Å от указанного центра. При этом на минимальном расстоянии, т.е. 2.01 Å, атом тория находится в молекуле $\text{Th}@C_{60}$. Другие локальные минимумы энергии в этой системе смещены вверх по энергетической шкале на 0.22 эВ и больше. Внутри C_{60} самый высокий локальный минимум при 1.17 эВ наблюдается, когда атом Th обращен к центру пятичленного углеродного кольца (пятиугольника).

КЛЮЧЕВЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАБОТ

1. Кондратенко П. С., Матвеев А. Л. Классическая адвекция-диффузия в неоднородных средах. // ЖЭТФ, 2020. — Т. 157. — В. 4. — С. 703. ID:20050.
2. Kondratenko P. S., Matveev L. V., Vasiliev A. D. A New Algorithm for Numerical Modeling of Impurity Transport in the Frame of Statistically Homogeneous Sharply Contrasting Media // Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling, January 2020.
3. Kondratenko P. S., Matveev L. V., Vasiliev A. D. Numerical simulation of colloid-facilitated impurity transport in porous media // Eur. Phys. J. B 93, 68 (2020). <https://doi.org/10.1140/epjb/e2020-100533-2>.
4. Kondratenko P. S., Matveev A. L., Vasiliev A. D. Numerical Implementation of the Asymptotic Theory of Classical Diffusion in Heterogeneous Media // Eur. Phys. J. B (2020), (in print).
5. Аветисян А. Р., Арутюнян Р. В., Большов Л. А., Кондратенко П. С., Матвеев Л. В. Математическая модель управления процессом изоляции радиоактивных отходов методом самопогружения в геологических массивах. // Атомная энергия, 2020. — Т. 129.
6. Obukhov Yu. N. Dynamics of classical and quantum spin in external fields: A general formalism // J. Phys.: Conf. Ser. — 2020. — Vol. 1435. — P. 012022 (6 pages).
7. Korotky V. A., Masár E., Obukhov Yu. N. In the quest for cosmic rotation // Universe. — 2020. — Vol. 6 (1). — P. 14 (89 pages).
8. Hehl F. W., Obukhov Yu. N. Conservation of energy-momentum of matter as the basis for the gauge theory of gravitation // "One Hundred Years of Gauge Theory: Past, Present and Future Perspectives", Eds. S. De Bianchi and C. Kiefer, Fundamental Theories of Physics 199. — Cham: Springer, 2020. — P. 217–252.
9. Puetzfeld D., Obukhov Yu. N. Generalized nonlocal gravity framework based on Poincaré gauge theory // Phys. Rev. D. — 2020. — Vol. 101. — P. 104054 (5 pages).
10. Obukhov Yu. N., Hehl F. W. General relativity as a special case of Poincaré gauge gravity // Phys. Rev. D. — 2020. — Vol. 102. — P. 044058 (10 pages).
11. Obukhov Yu. N. Generalized Birkhoff theorem in the Poincaré gauge gravity theory // Phys. Rev. D. — 2020. — Vol. 102. — P. 104059 (18 pages).
12. Trukhanova M. I., Andreev P. A quantum hydrodynamical model of skyrmions with electrical dipole moments and novel magneto-electric skyrmion Hall effect // Prog. Theor. Exp. Phys. — 2020. — Vol. 2020. — P. 043101 (16 pages).
13. Kim Y. Y., Gelisio L., Mercurio G., Dziarzhyski S., Beye M., Bocklage L., Classen A., David C., Gorobtsov O. Yu., Khubbutdinov R., Lazarev S., Mukharamova N., Obukhov Yu. N., Rösner B., Schlage K., Zaluzhnyy I. A., Brenner G., Röhlberger R., von Zanthier J., Wurth W., Vartanyants I. A. Ghost imaging at an XUV free-electron laser // Phys. Rev. A. — 2020. — Vol. 101. — P. 013820 (7 pages).
14. Vasiliev A., Matveev L., Mikhaylov A., Mitrofanov A., Obukhov Yu., Orekhov N., Osadchy A., Stegailov V.. Theoretical Study of Electronic Structure of Charged Fullerenes // Journal of Nanomaterials, Article ID 6656716, 2021, (in print).
15. Vasiliev A. D., Stuckert J. Application of Thermal Hydraulic and Severe Accident Code SOCRAT/V3 to Bottom Water Reflood Experiment QUENCH-20 with BWR bundle, Proc. International Conference "Nuclear Energy for New Europe 2020" (NENE-2020), Bled, Slovenia, September 7–10, 2020. NENE-2020-1808.
16. Burinskii A. Spinning Particle as Kerr-Newman Black Hole // Phys. Part. Nucl. Lett. — 2020. — Vol. 17, No. 5. — P. 724–729.
17. Burinskii A. Kerr-Newman black hole as spinning particle // J. Phys.: Conf. Ser. — 2020. — Vol. 1435. — P. 012053 (5 pages).
18. Burinskii A. Spinning particle as Kerr's black hole: To the problem of unification of gravity with particle physics // Int. J. Mod. Phys. A. — 2020. — Vol. 35, No. 2–3. — P. 2040009 (8 pages).
19. Burinskii A. The Kerr-Newman Black Hole Solution as Strong Gravity for Elementary Particles // Gravit. Cosmol. — 2020. — Vol. 26, No. 2. — P. 87–98.
20. Burinskii A. Electron as Kerr's super-rotating black hole // Advances in Theoretical and Computational Physics. — 2020. — Vol. 3, No. 4. — P. 235–237.
21. Tkalya E. V. and Si R. Internal conversion of the low-energy ^{229m}Th isomer in the thorium anion. // Phys. Rev. C 101, 054602, 2020. DOI: 10.1103/PhysRevC.101.054602.
22. Tkalya E. V. Excitation of ^{229m}Th at Inelastic Scattering of Low Energy Electrons. // Phys. Rev. Lett. 124, 242501, 2020. DOI: 10.1103/PhysRevLett.124.242501.
23. Bibikov V., Nikolaev A. V., Tkalya E. V. Chemical bonding between thorium and a carbon hexagon in carbon nanomaterials. // Phys. Chem. Chem. Phys. 22, 22501–22507, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1039/D0CP03970E>.
24. Kurelchuk U. N., Borisyuk P. V., Nikolaev A. V., Tkalya E. V. Estimation of the charge state of Th implanted in SiO₂ in the different atomic environment. // Journal of Phys.: Conf. Series 1686, 012064, 2020. DOI: 10.1088/1742-6596/1686/1/012064.

3 Развитие инфраструктуры

В 2020 году ИБРАЭ РАН выполнен ряд работ по развитию инфраструктуры и созданию оптимальных условий для эффективной работы научного коллектива Института в условиях санитарно-эпидемиологических ограничений и необходимости перехода многих сотрудников на дистанционный режим работы. Эти работы были направлены на: реконструкцию и повышение производительности систем жизнеобеспечения Института; развитие вычислительных и коммуникационных сетей Института, систем видеоконференцсвязи и удаленного доступа; поддержание в работоспособном состоянии и развитие применяемых измерительных систем.

Развитие вычислительных и коммуникационных сетей Института

В 2020 году осуществлялись следующие работы по развитию аппаратно-программного комплекса ИБРАЭ РАН, включающего в себя парк вычислительной техники (персональные компьютеры, рабочие станции, специализированные серверы и системы хранения данных), вычислительный кластер, информационные системы и системы видеоконференцсвязи, комплекс виртуализации:

- осуществлялась поддержка локальной компьютерной сети производительностью 10 гбит/с;
- увеличен доступный объем распределенной системы хранения данных (СХД);
- создана централизованная система доступа VPN для предоставления сотрудникам доступа к ресурсам и сервисам Института;
- создано облачное хранилище данных, предназначенное для использования сотрудниками ИБРАЭ;
- внедрена централизованная система видеоконференцсвязи (ВКС), интегрированная в инфраструктуру ИБРАЭ РАН (polycom);
- созданы и поддерживаются кластеры виртуализации VMware, KVM;
- создан централизованный кластер виртуальных рабочих мест, обеспечивающий для сотрудников ИБРАЭ РАН возможность работы в дистанционном режиме;
- общая производительность вычислительных

ресурсов Института увеличена на 40 TFlops и достигла 52 TFlops;

- было приобретено и введено в эксплуатацию более 80 единиц высокопроизводительных персональных компьютеров, рабочих станций и серверов. Для обеспечения их эффективного функционирования в 2020 году были закуплены или продлены ранее приобретенные лицензии (суммарно более 200 единиц), охватывающие 12 наименований ПО.

Своевременное обслуживание системы коммуникаций Института обеспечило в 2020 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, НТС № 10 «Экология и радиационная безопасность» Госкорпорации «Росатом», других научных и организационных мероприятий Института.

Развитие измерительных систем и оборудования

В круглосуточно действующем ЦНТП ИБРАЭ РАН поддерживается постоянная готовность мобильной группы радиационной разведки. В состав оборудования входят: спектрометр МКС-АТ6101С в комплектации «Васкраск» (включает сканер-идентификатор радионуклидов, GPS-приемник и компактный ПК) с функцией автоматического гамма-сканирования территории; высокочувствительные дозиметры-радиометры МКС-17Д «Зяблик», портативные дозиметры гамма- и рентгеновского излучения ДКГ-09Д «Чиж» со сцинтилляционным детектором; портативные индивидуальные дозиметры ДКГ-PM1610 «Полимастер». Мобильная группа использует специальный автомобиль, оснащенный системой непрерывного измерения мощности дозы гамма-излучения «Гамма-сенсор» и системой передачи данных в ЦНТП ИБРАЭ РАН в режиме реального времени.

4

Международное сотрудничество



Начальник отдела

Л. Г. Шпинькова

к.ф.-м.н.

(lgs@ibrae.ac.ru)

На протяжении многих лет ИБРАЭ РАН ведет активное сотрудничество с международными организациями и национальными институтами других стран. 2020 год для ИБРАЭ РАН не стал исключением, несмотря на жесткие ограничения, введенные в большинстве стран из-за пандемии, закрытие границ, отмену всех конференций и совещаний в очном формате. Мы продолжали активное сотрудничество с Агентством по ядерной энергии (АЯЭ) ОЭСР, МАГАТЭ, Институтом радиационной защиты и ядерной безопасности Франции (IRSN) и другими национальными организациями зарубежных стран.

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

Прежде всего, специалисты ИБРАЭ РАН продолжили свою работу в экспертных и рабочих группах Агентства. Избранные члены комитетов АЯЭ (научный руководитель ИБРАЭ РАН академик Л. А. Большов — член Бюро Комитета по безопасности ядерных установок АЯЭ, С. С. Уткин — член Комитета по обращению с радиоактивными отходами, Д. В. Бирюков — член Комитета по выводу из эксплуатации ядерных установок и обращению с объектами ядерного наследия) участвовали во всех совещаниях комитетов, которые, начиная с апреля 2020 г., проводились в дистанционном режиме.

Число экспертов ИБРАЭ РАН, представленных в комитетах, экспертных и рабочих группах АЯЭ, за 2020 год возросло до 16 человек. Специалисты ИБРАЭ РАН, с.н.с. А. В. Палагин

и инженер А. В. Власенко, были номинированы в новую экспертную группу по механике и термодинамике активной зоны реактора (**Expert Group on Reactor Core Thermal-Hydraulics and Mechanics**) Комитета по ядерной науке (NSC/EGTHM).

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

- «Эксперименты по смягчению последствий выброса водорода для обеспечения безопасности реактора» (**HYMERES-2**) (совместно с ГК по атомной энергии «Росатом») (отв. А. Е. Киселев и А. А. Канаев);
 - «Подготовка информационного отчета о современном состоянии проблемы поведения горючих газов при тяжелых авариях» (**HYDROGEN-SOAR**) (отв. А. Е. Киселев);
- и в 2020 г. стали участниками еще двух новых проектов АЯЭ:
- Анализ информации, касающейся зданий реакторов и контейнентов АЭС «Фукусима Дайичи» (**ARC-F**) (совместно с ГК по атомной энергии «Росатом») (отв. К. С. Долганов);
 - Составление отчета по анализу механической прочности корпуса реактора при внутрикорпусном удержании расплава» (**RPV Integrity**) (отв. А. С. Филиппов).

В августе 2020 г. ИБРАЭ РАН как активный участник совместных работ с АЯЭ был приглашен принять участие в **виртуальной миссии АЯЭ в Россию**, организованной по запросу ге-

нерального директора АЯЭ У. Магвуда. Научный руководитель ИБРАЭ РАН академик Л. А. Большов возглавил делегацию ИБРАЭ РАН в составе А. Е. Киселева, Л. Г. Шпиньковой, К. С. Долганова и А. А. Канаева.

В течение двух дней специалисты атомного сектора России, представляющие атомную промышленность России, надзорные органы, исследовательские и образовательные организации, обменивались информацией в формате видеоконференции и обсуждали вопросы развития современного, безопасного, экологически чистого и экономичного использования ядерной энергии в мирных целях и аспекты сотрудничества между Россией и АЯЭ.

В повестке дня стояли вопросы ядерной и радиационной безопасности и развития ядерной науки, безопасного обращения с радиоактивными отходами, профессиональной подготовки новых кадров с привлечением международного опыта. Особое внимание было уделено теме гендерного баланса в атомной отрасли.

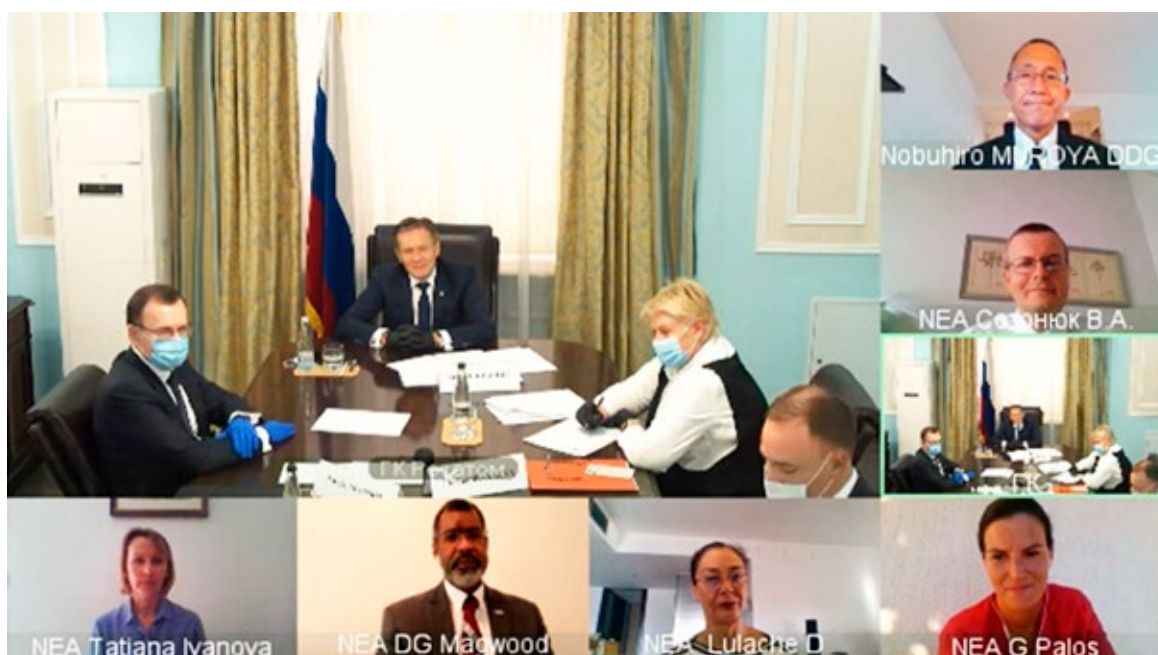
Сотрудники ИБРАЭ РАН К. С. Долганов и А. А. Канаев выступили с докладами о ходе работ по проектам АЯЭ ARC-F и HYMERES-2 соответственно.

В 2020 г. специалисты ИБРАЭ РАН приняли участие в **6 совещаниях АЯЭ** в очном формате (в январе-феврале 2020 г.) и в **15 совещаниях и конференциях в формате ВКС**.

Сотрудничество с Международным агентством по атомной энергии (МАГАТЭ)

В 2020 г. было продолжено активное научно-техническое сотрудничество с МАГАТЭ. ИБРАЭ РАН принимал участие в **6 научно-технических проектах**, заключенных ранее в рамках международных исследовательских проектов МАГАТЭ, связанных с расчетами поведения реакторных установок и топлива, расчета выхода продуктов деления при тяжелых авариях, планированием защитных мер при аварийном реагировании с учетом метеорологических данных и др.:

- Расчет нейтронных характеристик пусковых тестов **CEFR** с использованием транспортных (**CORNER**) и диффузионных компьютерных кодов нового поколения (отв. В. П. Березнев);
- Анализ протекания аварии ULOF без срабатывания АЗ в реакторе FFTF с использованием расчетного кода **ЕВКЛИД/V2** (отв. Н. А. Мосунова, С. В. Цаун);
- Валидация кода **BERKUT** по результатам экспериментов по облучению топливных стержней быстрыми нейтронами (В. И. Тарасов);
- Численное моделирование поведения продуктов деления в быстром реакторе PFBR во время тяжелой аварии с помощью кода **ЭВКЛИД** (Н. А. Мосунова, И. А. Климонов);
- Определение и оценка источников неопределенностей и их влияния на расчеты клю-



Виртуальная миссия АЯЭ в Россию. Фотография с сайта АЯЭ (https://oecd-nea.org/jcms/pl_37769/nea-conducts-virtual-missions-to-canada-japan-the-russian-federation-and-the-united-arab-emirates-uae-in-august-2020)

чевых параметров по тяжелоаварийному коду **СОКРАТ/ВЗ** (В. Н. Семенов, Н. И. Рыжов);

- Применение кода **NOSTRADAMUS** для определения зон при планировании защитных мер с учетом метеорологических данных для конкретных площадок на основе четырехмерных метеорологических полей (А. А. Киселев).

В 2020 г. ИБРАЭ РАН заключил новое соглашение с МАГАТЭ об участии в международном исследовательском проекте «Разработка таблиц определения и классификации явлений (**PIRT**), валидационной матрицы, а также выполнение бенчмарка для внутрикорпусного удержания расплава», в рамках которого проведет исследование по теме: «Применение кода HEFEST_URAN в экспериментальных/аналитических бенчмарках и участие в разработке PIRT и валидационной матрицы» (отв. А. С. Филиппов).

Специалисты ИБРАЭ РАН привлекаются к работам комитетов и экспертных групп МАГАТЭ, к участию в технических совещаниях. Так, с 2018 года А. А. Киселев работает в качестве эксперта в Комитете по стандартам в области аварийной готовности и аварийного реагирования МАГАТЭ (**Emergency Preparedness and Response Standards Committee, EPRSC.**), И. Л. Абалкина входит в Комитет МАГАТЭ по стандартам в области безопасного обращения с РАО (**Waste Safety Standards Committee, WASSC**) от Российской Федерации. Полномочия обоих специалистов ИБРАЭ в комитетах МАГАТЭ были продлены и на следующий год.

Как обычно, эксперты ИБРАЭ РАН участвовали в конференциях и технических совещаниях, организованных МАГАТЭ в 2020 г. в очном формате (в начале года), а также в онлайн совещаниях, учениях и вебинарах.

В 2020 г. специалисты ИБРАЭ РАН принимали участие в **совещаниях МАГАТЭ, посвященных подготовке крупных международных конференций**:

- Научный руководитель ИБРАЭ РАН академик Л. А. Большов принял участие в рабочих совещаниях в январе 2020 г. в штаб-квартире МАГАТЭ по подготовке к Международной научно-технической конференции «Атомная энергия: вызовы и перспективы», проведение которой было запланировано в Сочи в октябре 2020 г. как часть мероприятий в ознаменование 75-летия атомной отрасли. К сожалению, из-за значимого риска для здоровья и безопасности потенциальных участников конференции в связи с пандемией конференция перенесена на 2022 г.

- Заведующий отделением ИБРАЭ РАН д.т.н. Н. А. Мосунова является номинированным членом программного комитета конференции МАГАТЭ FR-21 «Быстрые реакторы и соответствующие топливные циклы: устойчивая экологически чистая энергия для будущего», проведение которой запланировано в Пекине (КНР) с 10 по 13 мая 2021 г., и участвует в онлайн совещаниях Комитета. Отметим, что сотрудники ИБРАЭ РАН представили 13 тезисов докладов на указанную конференцию.
- Заведующий отделением ИБРАЭ РАН д.т.н. С. С. Уткин в конце 2020 г. был номинирован для участия в работе консультативного совещания МАГАТЭ по подготовке международной конференции «Применение решений по обращению с радиоактивными отходами» (International Conference on Radioactive Waste Management: Solutions for a Sustainable Future), которая будет продолжаться и в 2021 г. Проведение конференции запланировано в Вене (Австрия) 1—5 ноября 2021 г.

Участие в европейской программе HORIZON-2020

В 2020 г. ИБРАЭ РАН **завершил работы по международному проекту IVMR**, посвященному исследованию возможности внутрикорпусного удержания расплава при аварии с плавлением активной зоны (IVMR — In-Vessel Melt Retention). Проект IVMR, в котором участвовали около 30 стран, проводился в рамках Восьмой рамочной программы Европейского Союза по развитию научных исследований и технологий HORIZON-2020. Сотрудники ИБРАЭ РАН В. Ф. Стрижов и А. С. Филиппов приняли участие в заключительном семинаре по проекту, который проходил в феврале 2020 г. во Франции в Институте радиационной защиты и ядерной безопасности Франции (IRSN) — головной организации по проекту. Был сделан доклад «Моделирование механики подплавленного корпуса при внутрикорпусном удержании расплава», в котором были представлены подходы к численному моделированию механики корпуса с учетом ограничений, накладываемых его состоянием при внутрикорпусном удержании, и отмечены нерешенные проблемы.

На семинаре также отмечалось, что проблема обоснования внутрикорпусного удержания при большой мощности тепловыделения, характерной для сценариев аварий в реакторах большой мощности, пока далека от полного решения. Ввиду важности рассматриваемой проблемы, в 2020 г. как МАГАТЭ, так и АЯЭ инициировали проекты, связанные с данным завершен-

ным европейским проектом IVMR. Отметим, что ИБРАЭ РАН подал заявки и стал участником обоих новых проектов по этой тематике.

Всемирная ядерная ассоциация (WNA)

С 2019 г. ИБРАЭ РАН возобновил свое членство во Всемирной ядерной ассоциации. Всемирная ядерная ассоциация является организацией, поддерживающей и пропагандирующей использование атомной энергии в мирных целях. WNA занимается вопросами производства электроэнергии на атомных станциях, а также всеми аспектами ядерного топливного цикла, от добычи урана до изоляции отработавшего топлива. WNA оказывает помощь своим членам в организации взаимодействия по техническим, коммерческим и политическим вопросам, а также по работе с населением с целью лучшего понимания атомных технологий.

Сотрудничество в Арктике

Среди проблем развития Арктической зоны особое место занимает проблема ликвидации радиоэкологических последствий холодной войны на дне Арктики, которая волнует не только российских граждан, но и международное сообщество. Этому вопросу был посвящен долгосрочный совместный проект международного консорциума в составе итальянской компании SOGIN, немецкой EWN, английской NUVEA и норвежской NRPA под названием: «Технико-экономические исследования и разработка плана действий по безопасному и надежному обращению с радиационно-опасными объектами, затопленными в Арктических морях», финансируемый Еврокомиссией. Бенефициаром проекта является ГК по атомной энергии «Росатом». К работам по проекту были привлечены специалисты ИБРАЭ РАН в рамках соглашения о субподряде с итальянской компанией SOGIN. Основные работы ИБРАЭ РАН были закончены в 2019 г., а в 2020 г. был **сформирован заключительный отчет**, представленный на рассмотрение Еврокомиссии, которая его одобрила. Компания SOGIN, поддержав позицию Еврокомиссии, выразила благодарность сотрудникам ИБРАЭ РАН за вклад в успешное выполнение проекта и его поддержку.

В контексте международного сотрудничества в Арктике необходимо также упомянуть издание журнала «Арктика: экология и экономика», который получил высокую оценку у научного сообщества. В канун 2021 г. Консультативным советом по отбору контента (CSAB) было принято решение о включении журнала в международную наукометрическую базу данных **SCOPUS**.

22—23 октября 2020 г. советник РАН академик А. А. Саркисов выступил с докладом на международной научно-практической конференции **«Безопасность арктических рубежей: экология, история, образы будущего»** (проводилась онлайн), посвященной Дням приграничного российско-норвежского сотрудничества. В конференции приняли участие Мурманское областное отделение РГО, представители государственных, коммерческих и неправительственных некоммерческих структур России, Норвегии и других приарктических стран, в том числе: Федеральный исследовательский центр Кольский научный центр РАН, Мурманский морской биологический институт РАН, Норвежский арктический университет, ряд экологических организаций, норвежская исследовательская компания «Акваплан нива».

ИБРАЭ РАН является **активным участником Российско-Скандинавской рабочей группы** по аварийной готовности и реагированию (отв. С. Н. Красноперов). Рабочая группа была сформирована в 2015 г. с целью планирования и активизации деятельности в рамках Российско-Скандинавского сотрудничества, обмену информацией, проведению круглых столов и других мероприятий по тематике аварийной готовности и реагирования. В последние годы к этому сотрудничеству присоединилась Республика Беларусь. От Российской Федерации за работу группы отвечает ГК по атомной энергии «Росатом».

В 2020 г. список намеченных встреч и мероприятий по Российско-Скандинавскому сотрудничеству пришлось сократить из-за невозможности их проведения в очном формате. В ноябре 2020 г. состоялось российско-норвежское совещание, основной целью которого был информационный обмен по объектам использования атомной энергии в соответствии с двусторонним Соглашением об уведомлении.

Двустороннее сотрудничество с национальными организациями зарубежных стран

Франция

Более 30 лет ведутся совместные работы ИБРАЭ РАН с Институтом радиационной защиты и ядерной безопасности (IRSN). Научные контакты между ИБРАЭ РАН и IRSN регулируются **Соглашением о сотрудничестве в сфере обеспечения ядерной безопасности**. Последняя версия соглашения была подписана в декабре прошлого года на очередные 7 лет. За этот долгий период ИБРАЭ и IRSN сотрудни-

чали в различных областях, от аварийного реагирования и проведения совместных учений, радиоэкологических исследований, связанных с Чернобыльской аварией, до совместной разработки кодов для оценки безопасности АЭС и моделирования выхода продуктов деления. В настоящее время акцент в сотрудничестве смещается в сторону научных исследований, связанных с анализом финальных стадий ЯТЦ и проблемами безопасного обращения с радиоактивными отходами. На протяжении ряда последних лет специалисты ИБРАЭ РАН совместно с французскими коллегами ведут работы по сравнительному анализу расчетных кодов для моделирования переноса радиоактивных примесей в ненасыщенных породах — Melodie (IRSN) и GeRa (ИБРАЭ РАН, отв. И. В. Капырин). В январе 2020 г. был согласован план совместной статьи, которая готовится к публикации в журнале «Радиоактивные отходы».

В течение 2020 г. проходили консультации по расширению работ в области обращения с РАО и финальной изоляции РАО, обсуждались возможные направления и темы сотрудничества, включая совместные работы в подземной лаборатории Турнемир во Франции и в строящейся российской подземной исследовательской лаборатории в Нижнеканском массиве (Красноярский край), где предполагается разместить создаваемые в рамках международных проектов экспериментальные установки. Было выявлено много общих интересов в этой области, и стороны договорились о проведении в начале 2021 г. онлайн-семинара на уровне экспертов с целью определения наиболее интересных направлений для совместных исследований.

На протяжении ряда лет ИБРАЭ РАН участвует в ежегодных совещаниях Рабочей группы по сотрудничеству в области мирного использования атомной энергии в рамках Российско-Французского Совета по экономическим, финансовым, промышленным и торговым вопросам (СЕФИК), а также в совещаниях Координационного Комитета в рамках сотрудничества между Государственной Корпорацией «Росатом» и Комиссариатом по атомной энергии и альтернативным энергоисточникам (КАЭ) Франции в области использования атомной энергии в мирных целях. В 2020 г. в обоих совещаниях принимала участие Л. Г. Шпинькова с докладами о научном сотрудничестве ИБРАЭ РАН и IRSN. Совещание Росатом-КАЭ проходило в феврале 2020 г. в городе Димитровград, совещание РГ СЕФИК — в ноябре 2020 г. в режиме видеоконференции.

Германия

ИБРАЭ РАН строит свое сотрудничество с научными организациями Германии на основе научно-технического сотрудничества Российской Федерации и Федеративной Республики Германия в области исследований по безопасности реакторов и захоронению радиоактивных отходов. Последнее по времени, 10-е совместное координационное заседание группы экспертов Государственной корпорации по атомной энергии («Росатом») Российской Федерации и Федерального Министерства экономики и энергетики (BMWi) Федеративной Республики в рамках этого сотрудничества проходило в Дрездене (Германия) 5—6 сентября 2019 г. На нем был обновлен «Перечень проектов российско-германского научно-технического сотрудничества в области мирного



10-е Совещание Координационного Комитета в рамках сотрудничества между Государственной Корпорацией «Росатом» и Комиссариатом по атомной энергии и альтернативным энергоисточникам (КАЭ) Франции в области использования атомной энергии в мирных целях, г. Димитровград, Ульяновская область, 3—6 февраля 2020 г.

использования ядерной энергии на 2019 г. и последующие годы».

ИБРАЭ РАН участвует в следующих проектах (до 2021 г.):

- Продолжение работ по разработке и валидации методов анализа неопределенностей теплогидравлических и нейтронно-кинетических расчетов при помощи расчетных программ AC2 (ATHLET, ATHLET-CD, COCOSYS), KORCAP, ТРАП-КС и СОКРАТ, а также сопряженных кодов на основе методов GRS;
- Обмен опытом по применению кодов CFD;
- Обмен опытом разработки и верификация кодов, описывающих поведение топлива и оболочек, TESPA-ROD и TVEL-3, SFPR и РАПТА;
- Взаимная верификация сопряженных расчетно-программных комплексов AC2 (ATHLET, ATHLET-CD, COCOSYS), а также ТРАП-КС KORCAP/ГП, СОКРАТ, АНГАР и КУПОЛ для моделирования аварий на реакторной установке и в контейнменте;
- Разработка и валидация расчетных моделей для пассивных систем безопасности новых российских проектов реакторов ВВЭР для кодов ATHLET, KORCAP, ТРАП-КС и СОКРАТ (напр. GE-2, СПОТ);
- Использование программных комплексов при анализах безопасности для жидкометаллических и газоохлаждаемых реакторов;
- Разработка модели вторичного гидрирования оболочек ТВЭЛов при течах;
- Моделирование поведения активной зоны реактора при условиях тяжелых аварий;
- Валидация и сравнительный анализ сопряженных кодов AC2 (ATHLET, ATHLETCD, COCOSYS), СОКРАТ и ASTEC;
- Обмен опытом по моделированию физических процессов, характерных для тяжелых аварий при помощи немецких и российских кодов;
- Исследования по внутрикорпусному удержанию расплава для ВВЭР-440 и ВВЭР-1000;
- Методические и экспериментальные исследования по водородной безопасности АЭС;
- Исследования водородной безопасности и работоспособности рекомбинаторов водорода в условиях тяжелых аварий с учетом новых знаний;
- Исследование коррозии поверхностно обработанных сталей в жидком свинце и свинце-висмуте;

- Основополагающие вопросы безопасного захоронения РАО (обмен информацией);
- Анализ безопасности и оптимизация концепции захоронения высокоактивных и долгоживущих радиоактивных отходов в гранитоидных формациях;
- Скважинные и лабораторные исследования для характеристики вмещающих пород и системы грунтовых вод.

В декабре 2020 г. сотрудники ИБРАЭ РАН (А. Е. Киселев, А. А. Канаев, Н. И. Рыжов) приняли участие (с докладом) в семинаре по обмену опытом при моделировании физических явлений при тяжелой аварии (Exchange of experience on the modelling of physical phenomena occurring during severe accidents) в режиме видеоконференции. Семинар был организован Обществом по безопасности установок и ядерных реакторов (GRS) gGmbH Германии в соответствии с Протоколом упомянутого выше 10-го совместного координационного заседания группы экспертов.

В указанных рамках Российско-германского сотрудничества в сентябре 2019 г. было подписано **5-стороннее соглашение** между Федеральным государственным унитарным предприятием «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами» (ФГУП «НО РАО»), Федеральным государственным бюджетным учреждением науки Институт проблем безопасного развития атомной энергетики российской академии наук (ИБРАЭ РАН), Федеральным институтом геологических наук и природных ресурсов Германии (БГР), БГЕ Технолоджи (ООО БГЕ ТЕК) и Обществом по безопасности установок и ядерных реакторов Германии (GRS) в области обращения с радиоактивными отходами, которое предусматривает работы по обоснованию долговременной безопасности пунктов геологического захоронения радиоактивных отходов, а также планирование и проведение экспериментальных исследований в российской подземной лаборатории в Нижнеканском массиве горных пород (ПИЛ НКМ). Подписанное соглашение определяет основы долговременного сотрудничества в этой области.

25 февраля 2020 г. в Ганновере (Германия) состоялась очередная встреча (в очном формате) по реализации подписанного соглашения о сотрудничестве в области захоронения радиоактивных отходов, на которой были выделены основные направления сотрудничества в ближайшие годы:

- подземная исследовательская лаборатория (ПИЛ);

- геологическая модель;
- расчет потока и транспорта;
- сбор дополнительных данных по образцам с площадки Енисейская;
- расчет аналитической модели безопасности

и назначены ответственные лица по каждому направлению. ИБРАЭ РАН, НО РАО и немецкие организации в конце 2020 г. начали экспертные встречи в дистанционном режиме для детализации планов сотрудничества.

Швейцария

В течение 2020 г. **ИБРАЭ РАН, НО РАО и Национальный кооператив по финальной изоляции радиоактивных отходов Швейцарии НАГРА** обсуждали возможности выполнения совместных исследований и разработок подходов и методов обращения с радиоактивными отходами и их захоронения. В самом конце 2020 г. состоялась онлайн **церемония подписания трехстороннего соглашения**. На церемонии директор ИБРАЭ РАН Л. В. Матвеев и заведующий отделением С. С. Уткин сделали доклады об основных направлениях деятельности ИБРАЭ РАН и участии ИБРАЭ РАН в российских программах обращения с РАО. На 2021 год запланировано начало активных консультаций по разработке планов сотрудничества.

Турция

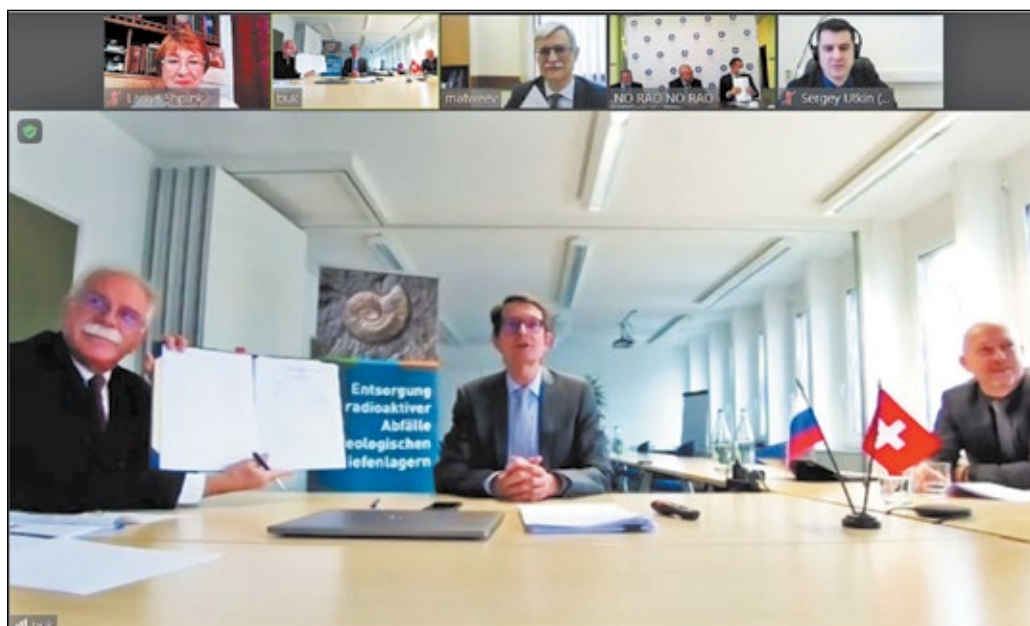
ИБРАЭ РАН начал сотрудничество с компанией **AKKUYU NÜKLEER ANONİM ŞİRKETİ**, строящей первую турецкую **АЭС «Аккую»** по российскому проекту ВВЭР-1200. Будет сооружено 4

блока общей мощностью 4800 МВт. Проектные решения станции АЭС «Аккую» отвечают всем современным требованиям к безопасности, закрепленным в нормах безопасности МАГАТЭ и Международной консультативной группы по ядерной безопасности и требованиям Клуба EUR. Каждый энергоблок будет оснащен активными и пассивными системами безопасности, предназначенными для предотвращения проектных аварий и/или ограничения их последствий.

Договор на выполнение работ по теме: «Расчет радиологических последствий для режима нормальной эксплуатации и аварийных режимов АЭС «Аккую» с учетом актуальных параметров площадки расположения АЭС» был подписан в марте 2020 г. между ИБРАЭ РАН и компанией **AKKUYU NÜKLEER ANONİM ŞİRKETİ**. Специалисты ИБРАЭ за истекший период провели анализ и верификацию полученных исходных данных, разработали модели радиологического воздействия для атмосферных выбросов и подготовили метеорологические параметры для проведения расчетов атмосферного переноса и доз облучения.

Китай

В марте 2020 г. в дистанционном режиме было подписано **3-стороннее соглашение о сотрудничестве** между Федеральным государственным унитарным предприятием «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами» (ФГУП «НО РАО»), Федеральным государственным бюджетным учреждением науки Институт проблем безопасного развития



Во время церемонии подписания трехстороннего соглашения между ИБРАЭ РАН, НО РАО и НАГРА

атомной энергетики Российской академии наук (ИБРАЭ РАН) и Пекинским научно-исследовательским институтом геологии урана (БРИУГ) в области долговременного хранения и захоронения радиоактивных отходов.

Соглашение заключено на четыре года с возможностью дальнейшей пролонгации, оно определяет рамки, формы сотрудничества и основные направления, к которым относятся следующие:

- концепция окончательной изоляции РАО;
- технологии характеристики объекта окончательной изоляции РАО;
- планирование, проведение и интерпретация исследований и экспериментов в подземной исследовательской лаборатории;
- исследование инженерных барьеров в подземных условиях;
- технологии и оборудование для окончательной изоляции;
- обоснование долговременной безопасности финальной изоляции РАО в скальном массиве;
- обмен опытом в области методов вовлечения общественности и повышения общественного принятия проектов по обращению с радиоактивными отходами, включая захоронение.

Япония

После ряда консультаций и встреч специалистов ИБРАЭ РАН и Института радиоактивности окружающей среды при Университете префек-

туры Фукусима (IER), Япония, в январе 2020 г. был подписан **Меморандум о взаимопонимании по сотрудничеству в области радиоэкологических исследований**. В ходе состоявшейся 30 января 2020 г. в ИБРАЭ РАН встречи, в которой приняли участие заместитель директора ИБРАЭ И. И. Линге и профессор IER М. И. Железняк, Стороны обменялись подписанными оригиналами Меморандума.

Меморандум предусматривает обмен научной информацией и данными, визитами специалистов, проведение совместных научно-исследовательских работ по следующим темам сотрудничества:

- методологические и расчетные вопросы моделирования распространения радионуклидов в окружающей среде, включая бенчмарки;
- оценка радиационного воздействия на человека и биоту;
- методология и практика измерения радиационных характеристик.

Одним из важных направлений сотрудничества является обмен визитами специалистов, студентами и аспирантами, а также обмен научной информацией. К сожалению, в 2020 году осуществить эти планы не удалось вследствие пандемии и закрытия границ между странами.

Во время встречи профессор IER М. И. Железняк рассказал о подготовке Университетом Фукусимы научной конференции, приуроченной к 10-летию со дня аварии на АЭС «Фукусима-1», и пригласил специалистов ИБРАЭ РАН принять в ней участие.



Заместитель директора ИБРАЭ РАН И. И. Линге и профессор IER М. И. Железняк обмениваются подписанными оригиналами Меморандума о взаимопонимании



Встреча специалистов ИБРАЭ РАН с профессором IER М. И. Железняком

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 2020 году ИБРАЭ РАН осуществлял успешное сотрудничество с ведущими российскими и зарубежными научными издательствами (МАИК-Интерпериодика, Springer, Elsevier) и международными библиотечными 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. Эта деятельность имела особое значение в условиях санитарно-эпидемиологических ограничений и связанного с ними перехода многих сотрудников Института на дистанционный режим работы.



ПРОФИЛЬНЫЕ КАФЕДРЫ

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

КАФЕДРА ПРОБЛЕМ БЕЗОПАСНОГО РАЗВИТИЯ СОВРЕМЕННЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ МФТИ

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

С 1992 года в ИБРАЭ РАН действует кафедра проблем безопасного развития современных энергетических технологий, входящая в организационную структуру факультета проблем физики и энергетики МФТИ. Кафедра осуществляет подготовку специалистов для работы в новой, бурно развивающейся области науки, связанной с исследованием общих закономерностей протекания экологических и промышленных катастроф, разработкой научных методов оценки рисков, мониторинга и анализа чрезвычайных ситуаций.

Кафедра готовит специалистов по следующим научным направлениям:

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

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

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

В учебном процессе задействованы ведущие специалисты Института, в числе которых академик РАН Большов Л.А., академик РАН Саркисов А.А., а также 8 докторов и 7 кандидатов наук.

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

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

В 2020 году на кафедру были зачислены 7 второкурсников, из которых шестеро пришли на 3-й курс. Закончили 3-й курс — 13 чел., пришли на 4-й курс — 12 чел. Закончили 4-й курс, т.е. бакалавриат, — 7 чел., пришли на 5-й курс в магистратуру — 1 чел. Закончили 5-й курс и пришли на 6-й курс — 5 чел. Закончили 6-й курс, т.е. магистратуру, — 2 чел., из которых 1 остался в аспирантуре ИБРАЭ РАН.

Учебный процесс в весеннем и осеннем семестрах 2020 г. проводился в основном в дистанционном режиме обучения. Студентам, изъявившим желание проходить обучение на базовой кафедре в очном режиме, такая возможность была предоставлена по тем курсам, преподаватели которых имели право это делать (с учетом действовавшего в Москве режима самоизоляции).

Общий учебный план кафедры

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

НА КАФЕДРЕ ПРЕПОДАЮТ:

2

АКАДЕМИКА
РАН

8

ДОКТОРОВ
НАУК

7

КАНДИДАТОВ
НАУК

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

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

Пятикурсники продолжают посещать семинары по специальности, слушают 10 спецкурсов и проводят научную работу под руководством своих научных руководителей по теме своей магистерской диссертации.

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

В 2020 году сдача зачетов и экзаменов, а также защита бакалаврских работ и магистерских диссертаций осуществлялись в дистанционном режиме.

Дисциплины бакалавриата

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

Дисциплины магистратуры:

- аномальные режимы переноса в сильно неоднородных средах;
- гидродинамика многофазных течений;
- моделирование тяжелых аварий;
- системы поддержки 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;
- экономика безопасности энергетики.

Студенты кафедры имеют возможность одновременно с учебной работой в научных под-

разделениях ИБРАЭ РАН. Наиболее перспективные выпускники могут остаться работать в ИБРАЭ РАН, а также поступить в аспирантуру ИБРАЭ РАН или МФТИ.

В 2020 году в ИБРАЭ РАН в рамках ежегодной 63-й научной конференции МФТИ в дистанционном режиме проводилась «Секция проблем безопасного развития атомной энергетики», в работе которой, помимо студентов и аспирантов МФТИ, приняли участие молодые научные сотрудники ИБРАЭ РАН и представители других вузов и организаций.

Институт активно участвует в международном научном сотрудничестве, к этой деятельности привлекаются также студенты и аспиранты кафедры.

Успешно работающие студенты и аспиранты получают стипендию Дирекции института.

КАФЕДРА «ТЕХНОЛОГИИ ЗАМКНУТОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА» НИЯУ МИФИ

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

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

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

Примеры курсов на базе ИБРАЭ РАН:

- **Моделирование процессов, протекающих в твэлах.** Рассматриваются основные процессы в топливе и оболочке твэла, определяющие и влияющие на его работоспособность и герметичность при облучении в а.з. реакторных установок на быстрых нейтронах; проводятся практические занятия с кодом нового поколения БЕРКУТ.
- **Вычислительные технологии прикладного математического моделирования.** Обсуждаются современные вычислительные технологии, ориентированные на приближенное решение прикладных проблем, математические модели которых базируются на системах уравнений с частными производными; проводятся практические занятия с вычислительной платформой FEniCS.
- **Исследования теплогидравлики реакторных установок с водяным и жидкометаллическим теплоносителями.** Обсуждаются общие вопросы моделирования процессов теплообмена в контурах РУ с водяным и жидкометаллическим теплоносителями; проводятся практические занятия с кодом нового поколения HYDRA-IBRAE/LM.
- **Нуклидная кинетика и радиационная безопасность.** Рассматриваются вопросы обоснования радиационной безопасности алгоритмы моделирования нуклидной кинетики с оценкой изменения нуклидного состава среды, остаточного тепловыделения, активности

и погрешности рассчитываемых параметров как в реакторе на быстрых нейтронах, так и в объектах ядерного топливного цикла; проводятся практические занятия с кодом нового поколения BPSD.

- **Интегральные расчеты реакторных установок с жидкометаллическим теплоносителем.** Рассматриваются особенности конструкции РУ с жидкометаллическим теплоносителем (основное оборудование, варианты компоновки, используемые и перспективные типы топлива и теплоносителя), разбираются вопросы связанного моделирования различных физических процессов; проводятся практические занятия с кодом нового поколения ЕВКЛИД.

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

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



АСПИРАНТУРА

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

- 03.06.01 Физика и астрономия;
- 09.06.01 Информатика и вычислительная техника;
- 14.06.01 Ядерная, тепловая и возобновляемая энергетика и сопутствующие технологии;
- 20.06.01 Техносферная безопасность.

Форма обучения — очная.

Кандидаты сдают вступительные экзамены по английскому языку и специальности. Иногородным аспирантам предоставляется общежи-

тие Российской академии наук. Аспиранты, обучающиеся на бюджетной основе, получают стипендию и могут работать в ИБРАЭ РАН в качестве научных сотрудников.

В 2020 году в аспирантуре ИБРАЭ РАН обучалось 22 аспиранта, среди которых — выпускники магистратуры базовой кафедры, а также выпускники МГУ, МИФИ, МЭИ и ряда других ведущих вузов России. В 2020 году аспирантуру закончили 4 аспиранта, все они остались работать в ИБРАЭ. Новый прием составил 4 человека, в числе которых — один выпускник базовой кафедры.



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

С 1995 года в ИБРАЭ РАН на регулярной основе проводятся защиты кандидатских и докторских диссертаций по тематикам, связанным с проблемами обеспечения безопасности атомной энергетики. В настоящее время в Институте работает диссертационный совет Д 002.070.01 (действующий на основании приказа Минобрнауки России от 15 февраля 2013 г. № 75/нк) по защите диссертаций на соискание кандидатских и докторских степеней по двум специальностям номенклатуры специальностей научных работников, утвержденной приказом Минобрнауки России от 25.02.2009 № 59:



Защита кандидатской диссертации Самойловым А. А. по теме «Системная оптимизация и обоснование решений по безопасной эксплуатации установок по обращению с РАО на объектах ядерного топливного цикла» впервые проходила в формате видеоконференции, связь обеспечивалась средствами ВКС ИБРАЭ РАН

- 01.04.14 «Теплофизика и теоретическая теплотехника» (физико-математические науки);
- 05.14.03 «Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации» (технические науки).

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

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

За период 1995—2018 гг. в Институте были успешно защищены 31 кандидатская и 11 докторских диссертаций по актуальным проблемам

современной физики, теоретическим и практическим аспектам обеспечения безопасности атомной энергетики. Более трети из числа защитившихся представляют научные и производственные учреждения атомной отрасли России и ряда зарубежных стран, что подчеркивает авторитетность диссертационного совета ИБРАЭ РАН в мировой научной среде.

За последние 5 лет ученые степени присуждены 12 соискателям, 10 из них — сотрудники ИБРАЭ РАН.

В 2020 г. в Институте сотрудниками ИБРАЭ РАН были успешно защищены 1 кандидатская и 1 докторская диссертации по теоретическим и практическим аспектам обеспечения безопасности атомной энергетики. При этом кандидатская диссертация А. А. Самойлова стала первой, защита которой проходила в новом онлайн-формате.



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>). Как следует из статистических данных, полученных с использованием сервисов Яндекс-метрика и Google Analytics, количество визитов в период с 1 января 2020 года по 1 января 2021 года составило **41 309** посещений; число новых посетителей в 2020 г. превысило **26 000** человек. Общее количество просмотров активных страниц сайта в период с 1 января 2020 года по 1 января 2021 года достигло **127 669** при высокой средней глубине просмотра **3,09** 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», большое количество научно-просветительской литературы по тематике безопасности атомной энергетики.

В 2020 г. Институтом подготовлены и изданы более **10** учебных пособий по компьютерным кодам нового поколения в рамках реализации проекта «Коды нового поколения», входящего в состав проектного направления «Прорыв».

Значительное место в научно-издательской деятельности Института занимает публикация препринтов научных трудов сотрудников ИБРАЭ РАН. С 1994 года издано более **300** препринтов,

224 135

ПРОСМОТРОВ

**СУММАРНОЕ КОЛИЧЕСТВО
ЗА 2020 ГОД НА САЙТАХ ИБРАЭ РАН
И ВЫПУСКАЕМЫХ НАУЧНЫХ
ЖУРНАЛОВ**

охватывающих все основные направления деятельности Института. В 2020 г. опубликовано **4 препринта**, еще несколько препринтов готовятся к публикации в 1-м квартале 2021 г.

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

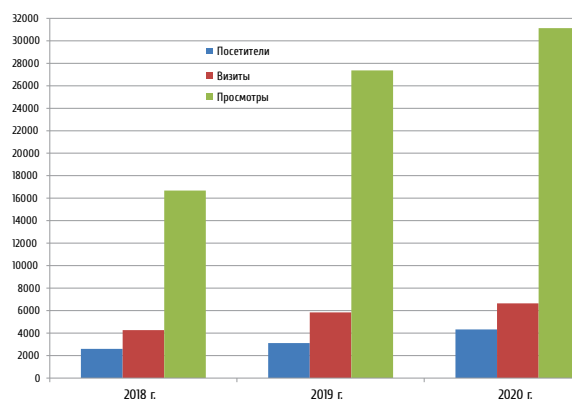
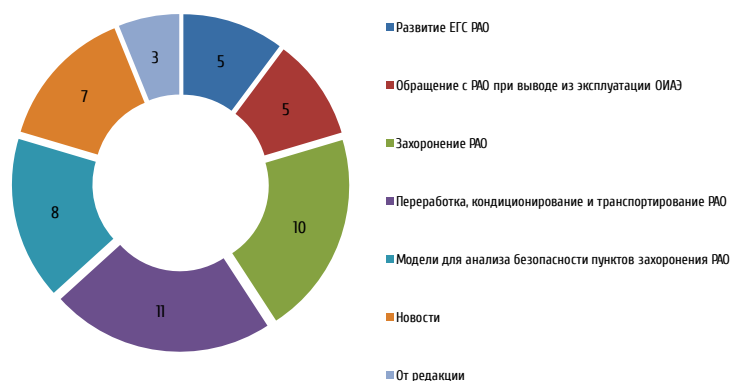
ЖУРНАЛ «РАДИОАКТИВНЫЕ ОТХОДЫ»

Научно-технический журнал «Радиоактивные отходы» издается с 2017 года, его учредителем является ИБРАЭ РАН. 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.

Целью создания журнала является интенсификация и углубление обмена опытом между специалистами, работающими по тематике, связанной с радиоактивными отходами, и квалифицированное обсуждение результатов всех крупных работ в сфере обращения с радиоактивными отходами, реализуемых эксплуатирующими организациями, в том числе в рамках мероприятий федеральной целевой программы «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016—2020 годы и на период до 2030 года». Главная цель издания научно-технического журнала — повышение эффективности и безопасности обращения с РАО за счет формирования национального научно-информационного ресурса, обобщение и пропаганда научных знаний в этой области.

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

Распоряжением Минобрнауки России от 22 декабря 2020 г. № 443-р, научно-технический журнал «Радиоактивные отходы» включен в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук и ученой степени доктора наук по следующим научным специальностям и соответствующим им отраслям наук, по которым присуждаются ученые степени:



Распределение публикаций по рубрикам журнала «РАО» в 2020 г. и посещаемость сайта журнала в 2018–2020 гг.

- 05.14.03 – Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации (технические науки);
- 05.26.05 – Ядерная и радиационная безопасность (технические науки);
- 25.00.07 – Гидрогеология (технические науки);
- 25.00.09 – Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых (техн. науки);
- 25.00.21 – Теоретические основы проектирования горнотехнических систем (техн. науки);
- 25.00.36 – Геоэкология (по отраслям) (технические науки);
- 25.00.36 – Геоэкология (по отраслям) (геолого-минералогические науки).

Журнал «Радиоактивные отходы» индексируется в РИНЦ.

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

В 2020 году в 4 выпусках журнала опубликовано **44** статьи, составившие **42%** от общего количества статей, посвященных проблеме обращения с радиоактивными отходами, опубликованных за этот год в основных российских периодических изданиях, что несколько меньше, чем было в 2019 г. (**44%**). Наибольшее количество опубликованных статей было посвящено темам захоронения радиоактивных отходов, а также вопросам их переработки и кондиционирования. Среди авторов статей **76%** — работники научных и проектных организаций.

В подготовке материалов журнала в 2020 году приняли участие **127** ученых и специалистов, среди которых **1** академик РАН, **17** докторов наук, **46** кандидатов наук (что составляет **50,4%** от общего числа авторов); в 2019 году в числе **162** авторов статей было **44** доктора и **60** кандидатов наук (**64,2%** от общего числа авторов).

По данным РИНЦ за 2019 год, число выпусков журнала составило **12**, общее число статей — **157**. Двухлетний импакт-фактор составляет **1,636**. По состоянию на январь 2021 г. общее число цитирований журнала в РИНЦ — **378** (в 2019 г. — **129** цитирований, в 2018 г. — **42** цитирования).

Отметим, что в 2020 г. возросла посещаемость сайта журнала, что является одним из признаков востребованности журнала у целевой аудитории. Общее количество просмотров страниц сайта в период с 1 января 2020 г. по 1 января 2021 г. достигло **31 128** (за 2019 г. — **27 372** просмотров) при средней глубине просмотра **3,49** страницы за визит. Таким образом, увеличивается интерес к материалам журнала, и он становится все более востребованным.

42%

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

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 г.), индексируется в РИНЦ, входит в ядро РИНЦ, включен в базу данных Russian Science Citation Index (RSCI) на платформе Web of Science (с 2018 г.), базу данных открытого доступа DOAJ (с 2019 г.) и международную библиометрическую и реферативную базу данных EBSCO (с декабря 2019 г., база данных «Academic Search Ultimate»).

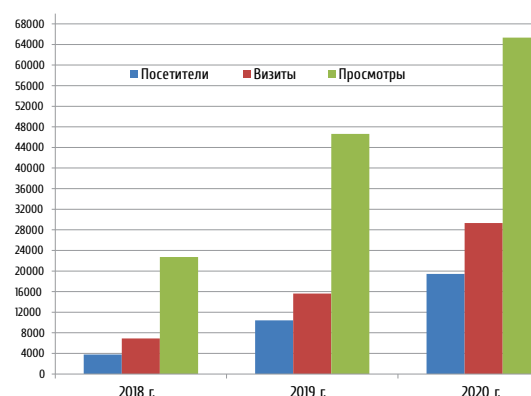
В декабре 2020 г. решением Консультативного совета по отбору контента (CSAB) журнал «Арктика: экология и экономика» включен в международную наукометрическую базу данных SCOPUS. В течение первого квартала 2021 г. будет подписано соглашение о порядке предоставления контента, после чего статьи, размещенные в журнале, будут индексироваться в базе данных SCOPUS.

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

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

В 2020 году в **4** выпусках журнала опубликовано **47** статей. В их подготовке приняли участие **119** ученых и специалистов, среди которых **7** академиков и членов-корреспондентов РАН, **29** докторов наук, **42** кандидата наук (что составляет **65,5%** от общего числа авторов); в 2019 году в числе **119** авторов статей — **3** академика и члена-корреспондента РАН, **44** доктора наук и **37** кандидатов наук (**70,5%** от общего числа авторов).

По данным РИНЦ за 2019 год, журнал занимает 239-е место среди всех российских научных журналов в рейтинге SCIENCE INDEX и **2-е место** по тематике «Комплексное изучение отдельных стран и регионов» (в 2018 году журнал занимал 266-е место в рейтинге, а в 2017 году — 488-е место); пятилетний импакт-фактор составляет **1,522**, а двухлетний импакт-фактор — **2,300**. По состоянию на январь 2021 года общее число



Распределение статей по основным рубрикам в 2020 г. и посещаемость сайта журнала «Арктика: экология и экономика» в период 2018–2020 гг.

цитирований журнала в РИНЦ — **4 195**; количество цитирований в 2019 году составило **504** по сравнению с **436** в 2018 году. Значительное улучшение библиометрических показателей журнала и устойчивая положительная динамика в части цитирования опубликованных в нем научных статей свидетельствуют о большом интересе к нему представителей научного сообщества.

Как следует из статистических данных, полученных с использованием сервисов Яндекс-метрика и Google Analytics, количество визитов на интернет-сайт журнала (<http://arctica-ac.ru>) в период с 1 января 2020 года по 1 января 2021 года возросло на **87%** по сравнению с аналогичным периодом 2019 г. и составило **29 306** посещений; число посетителей в 2020 г. составило **19 446**, то есть, возросло на **87,5%** по сравнению с 2019 г. Общее количество просмотров активных страниц сайта в период с 1 января 2020 года по 1 января 2021 года достигло **65 337** при достаточно высокой средней глубине просмотра **2,23** страницы за визит. Существенный рост посещаемости сайта свиде-

тельствует как о высоком качестве научного материала журнала, актуальности и востребованности его контента, так и о формировании устойчивой целевой аудитории журнала, в которую входит большое количество ученых и специалистов, тесно связанных с его тематикой. Этому в значительной мере способствовала **масштабная модернизация сайта**, проведенная в 2019 году с учетом требований международных наукометрических баз данных. Новый функционал сайта обеспечивает широкие функциональные и сервисные возможности и ориентирован на интеграцию в поисковых системах в русскоязычном и в англоязычном сегментах Интернета.

Включение журнала «Арктика: экология и экономика» в ведущие международные наукометрические и библиографические базы данных, наряду с участием в работе Редакционного совета ряда авторитетных зарубежных ученых, позволит существенно расширить сферу охвата целевой аудитории, в том числе в ее англоязычном сегменте, и повысить уровень цитируемости статей журнала в иностранной научной литературе.

УЧАСТИЕ УЧЕНЫХ ИНСТИТУТА В РАБОТЕ НАУЧНЫХ СОВЕТОВ ПО ПРОБЛЕМАМ БЕЗОПАСНОСТИ В ОБЛАСТИ ЭНЕРГЕТИКИ И РЕДАКЦИОННЫХ КОЛЛЕГИЙ НАУЧНЫХ ЖУРНАЛОВ

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

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

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



Журналы «Арктика: экология и экономика» за 2020 год

6

Общественные организации



СОВЕТ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ

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

Совет осуществляет деятельность по четырем направлениям.

- Вовлечение студентов профильных кафедр в научно-исследовательскую деятельность Института путем организации и проведения семинаров «Введение в специальность», на которых ведущие ученые и специалисты Института рассказывают об актуальных и перспективных направлениях его работы.
- Стимулирование научной деятельности молодых ученых, в том числе проведение ежегодного конкурса на лучшую научную работу молодых ученых и научной конференции «Школа молодых ученых ИБРАЭ РАН».
- Ознакомление молодых специалистов с предприятиями атомной отрасли, включая организацию технических туров, демонстрацию

тематических научно-популярных и художественных фильмов.

- Культурно-массовая и спортивная работа.

В 2020 году в связи со сложной санитарно-эпидемиологической обстановкой и принятыми в связи с этим ограничительными мерами в Москве и Московской области большинство ранее запланированных мероприятий СМУиС были отменены или перенесены на 2021 год. Так, в 2020 году в очном режиме состоялись 8 семинаров «Введение в специальность», однако после перехода на дистанционный режим обучения студентов профильных кафедр проведение этих семинаров было приостановлено, а в сентябре 2020 года продолжилось в формате видеоконференций. Начатые подготовительные работы по организации технического тура молодых ученых ИБРАЭ РАН на Белоярскую АЭС с датой проведения 1—4 июня 2020 года тура были, по вышеуказанным причинам, свернуты после 17.03.2020 г.



Собрание СМУиС ИБРАЭ РАН, слева направо: Власенко А. Е., Бутов Р. А., Корчагина О. О., Каменская Д. Д., Галоян Н. А., Задорожный А. В., Валетов Д. К., 2020 год



ПЕРВИЧНАЯ ПРОФСОЮЗНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ИБРАЭ РАН

В 2020 году численность членов профсоюза в Институте составила 318 человек, сохраняя по этому показателю стабильность в течение 5 последних лет. Оперативное руководство осуществлялось Профкомом ИБРАЭ, который состоит из 9 человек, являя собой сплав молодости и опыта.

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

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

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



Состав Профсоюзного комитета ИБРАЭ РАН, 2020 год.

Стоят: Селиванова Е. Н., Ильющенко Г. Э., Наконечная Е. Л., Долгов В. Н., Блохин П. А.

Сидят: Гаврилина Е. А., Панченко С. В., Евдокимова З. А., Гигелева С. Е.

Список сокращений

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

CPU — центральный процессор (Central Processing Unit)

GPU — графический ускоритель (Graphics Processing Unit)

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

NEA — Nuclear Energy Agency, см. АЯЭ

PLM — управление жизненным циклом (Product Lifecycle Management)

WRF — региональная модель численного прогноза погоды

а.з. — активная зона реактора

авария запроектная — авария, вызванная не учитываемыми для проектных аварий исходными событиями или сопровождающаяся дополнительными по сравнению с проектными авариями отказами элементов систем безопасности сверх единичного отказа, реализацией ошибочных решений персонала (НП-001-15)

авария проектная — авария, для которой в проекте атомной станции определены исходные события и конечные состояния и предусмотрены системы безопасности, обеспечивающие при независимом от исходного события отказе одного из элементов систем безопасности, учитываемом в проекте атомной станции, или при одной, независимой от исходного события, ошибке персонала ограничение ее последствий установленными для таких аварий пределами (НП-001-15)

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

АЗ — аварийная защита

АПЛ — атомная подводная лодка

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

АСКРО — автоматизированная система контроля радиационной обстановки

АСММ — атомная станция малой мощности

АТО — атомное технологическое обслуживание

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

БН — реактор на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем

БПЛА — беспилотный летательный аппарат

ВАБ — вероятностный анализ безопасности

ВВЭР — атомный реактор водо-водяного типа

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

ВЭ — вывод из эксплуатации

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

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

ДР — дистанционирующая решетка

ЕБРР — Европейский банк реконструкции и развития

ЕГС РАО — Единая государственная система обращения с РАО

ЖРО — жидкие радиоактивные отходы

ЗН — зона наблюдения

ЗО — защитная оболочка АЭС

ЗСЖЦ — заключительная стадия жизненного цикла

ИИИ — источник ионизирующего излучения

ИРММ — интегральная расчетная математическая модель

ИСУП — информационная система управления программой комплексной утилизации

КИА — контрольно-измерительная аппаратура

КИРО — комплексное инженерное и радиационное обследование

ЛП — Лагранжев подход

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

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

МЭД — мощность эквивалентной дозы

НДС — напряженно-деформированное состояние

НИР — научно-исследовательские работы

НИОКР — научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы

НКМ — Нижнеканский массив горных пород

НК с ЯЭУ — надводный корабль с ядерной энергетической установкой

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

НУЭ — нормальные условия эксплуатации

ОДЭК — опытно-демонстрационный энергокомплекс

ОИАЭ — объект использования атомной энергии

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

ОПС — окружающая природная среда

ОТВС — отработавшие тепловыделяющие сборки

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

ОЯН — объект ядерного наследия

ОЯТ — отработавшее ядерное топливо

ПА — см. «авария проектная»

ПАТЭС — плавучая атомная теплоэлектростанция

ПБС — поддержание в безопасном состоянии

ПВХ — пункт временного хранения

ПГЗРО — пункт глубинного захоронения радиоактивных отходов

ПДХ — пункт длительного хранения

ПЗРО — пункт захоронения радиоактивных отходов

ПИЛ — подземная исследовательская лаборатория

ПКУ — программа комплексной утилизации

ПН — проектное направление

ПС — программное средство

ПТК — программно-технический комплекс

ПТБ — плавучая техническая база

ПХ — пункт хранения

пэл — поглощающий элемент

РАО — радиоактивные отходы

РБ — радиационная безопасность

РБМК — реактор большой мощности канальный

РВ — радиоактивные вещества

РИД — результат интеллектуальной деятельности

РИНЦ — российский индекс научного цитирования (библиометрическая база данных)

РКО — расчетный комплекс оптимизации

РПК — расчетно-прогностический комплекс

РСЧС — Единая государственная система предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций

РУ — реакторная установка

САПР — система автоматизированного проектирования (CAD)

СЗЗ — санитарно-защитная зона

СМП — Стратегический мастер-план

СНУП топливо — смешанное нитридное уран-плутониевое топливо

СХД — система хранения данных

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

СЦР — самоподдерживающаяся цепная реакция деления

ТВС — тепловыделяющая сборка

твэл — тепловыделяющий элемент

ТЖМТ — тяжелый жидкометаллический теплоноситель

ТКВ — Теченский каскад водоемов

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

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

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

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

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

ЦППР — Центр поддержки принятия решений

ВНИИ ГОЧС (ФЦ) — Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России (федеральный центр науки и высоких технологий)

ПЗУА — предельные значения удельной активности

ФЦП — Федеральная целевая программа

ФОИВ — федеральные органы исполнительной власти

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

ЧС — чрезвычайная ситуация

ЭМИ — электромагнитный импульс

ЭП — Эйлеров подход

ЯРБ — ядерная и радиационная безопасность

ЯРОО — ядерно и радиационно опасный объект

ЯТЦ — ядерный топливный цикл

ЯЭУ — ядерная энергетическая установка

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