

# СТАТЬИ

---

УДК 621.039

## СТРАТЕГИЯ РАЗВИТИЯ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ РОССИИ И ВОПРОСЫ ЭКОЛОГИИ

*Большов Л.А., Линге И.И. (ИБРАЭ РАН, г. Москва)*

e-mail: linge@ibrae.ac.ru

В 2018 г. Госкорпорацией «Росатом» были сформированы основные положения стратегии развития ядерной энергетики России до 2050 г. и перспективы на период до 2100 г. [1]. Появление стратегии глубоко позитивно:

появилась основа для обсуждения долгосрочной перспективы;

предусматривается ее актуализация по мере прохождения технологических развилок, которая, возможно, коснется и жидкосолевого реактора, и газоохлаждаемых наработчиков водорода;

демонстрируются сложность перспективной оценки и необходимость перевода этой работы на регулярную и более широкую основу, поскольку будущее ядерной энергетики определяется не только конструкторскими, проектными и эксплуатирующими организациями, но и позицией общества в отношении ее безопасности и экологической приемлемости.

Будучи убежденными сторонниками ядерной энергетики и изучая уже более 30 лет проблемы ее безопасного развития, авторы настоящей статьи считают необходимым сформулировать предложения по некоторым направлениям деятельности в обеспечение стратегии [2].

Вначале отметим, что некоторые высказанные в работе [3] замечания в адрес стратегии считаем заслуживающими обсуждения, в том числе в части подхода к ее экономическому обоснованию, оценок запасов урана, сопоставления подтвержденных опытом эксплуатации данных с оценочными для разрабатываемых проектов энергоблоков. Но с выводом о необходимости сосредоточить планирование на более коротких этапах, а именно на временных горизонтах технологических развилок, не согласны. Принятый в стратегии интервал времени до

2100 г. — это менее двух сроков службы современных АЭС, значит, это уже завтра, и это завтра должно постоянно прогнозироваться с учетом возможного облика ядерной энергетики и всех иных значимых аспектов.

Теперь выскажем несколько собственных замечаний и предложений.

Об экономических критериях. В качестве основного инструмента оценки конкурентоспособности в стратегии применен показатель удельной приведенной стоимости электроэнергии LCOE. Не вдаваясь в детальный анализ, отметим, что исходно этот показатель предназначен для локальных решений по развитию бизнеса в сфере электрогенерации и приемлем в качестве первого шага оценки экономической приемлемости. В то же время финансово-экономической устойчивости отводится в документе более значимое место по сравнению с вопросами обеспечения радиационной, экологической безопасности и общественной приемлемости. Хотя в стратегии есть указание на гарантированную безопасность, в иных документах Госкорпорации «Росатом» даются более четкие целевые установки, которых недостает в стратегии. Например, в программе [4] заявлено: «Безопасность — наивысший приоритет, который не может быть отменен в пользу эффективности...» Что не менее важно, требуется учитывать растущую значимость экологических критериев и соответственно прогнозировать будущий рост затрат на экологические налоги и платежи. В стратегии таких оценок нет.

Об источниках неопределенностей в прогнозах. Понятие «неопределенность» в отношении периода до 2100 г. встречается в стратегии всего один раз, причем исключительно в смысле ее успешного преодоления. По отношению к

расчетам неопределенность вообще не упоминается. Для сравнения: в аналогичном по масштабу документе [5] с анализа неопределенностей начинается раздел по экономике. По нашему убеждению, основными источниками неопределенности сегодня являются и будут еще долго оставаться экологические оценки и общественное восприятие. Причем последнее актуально не только в части безопасности ядерных реакторов, что рассмотрено в стратегии, но и в более широком плане, т.е. в отношении всего ядерного топливного цикла.

Возможность объективного общественного восприятия содержания и способов разрешения проблем глобальной экологической безопасности может реализоваться в будущем только при наличии достаточных усилий. Стратегия должна показать необходимость таких усилий и определить их направление. Например, нужно формулировать, поддерживать и актуализировать тезисы о преимуществах ядерной энергетики в сфере ядерной, радиационной и экологической безопасности. Пока в этой области сложилась неблагоприятная ситуация. Ядерная энергетика воспринимается как опасная технология, для отказа от которой в некоторых странах, например, в Германии готовы идти на издержки масштаба десятков миллиардов евро. Стратегии полного воспроизводства мощностей АЭС реализуются только в единичных странах с ограниченной ресурсной базой, стратегии интенсивного роста — только в развивающихся странах, адаптированных к более высоким уровням риска для достижения экономических результатов.

Экологичность ядерной энергетики долгое время оставалась непризнанной. Глобальные экологические инициативы, включенные в повестку дня в конце прошлого и в нынешнем тысячелетии (конференция в Рио и др.), были близки к включению мощных финансовых инструментов предотвращения эмиссии углерода, в том числе по торговле квотами и т.д. Тем не менее ядерная генерация (почти 400 ГВт/год), предотвращая эмиссию углерода в объеме почти 2,5 млрд т в год в пересчете на угольные и газовые ТЭС, была исключена из предусмотренных Киотским протоколом механизмов гибкости. Уровень ее непризнанности хорошо иллюстрируется тем, что объемы предотвращенной эмиссии одного порядка с вкладом всех лесов мира.

Ситуация немного исправилась с заключением Парижского климатического соглашения, которое не содержит прямого запрета на ядерную энергетику. Однако в числе вариантов снижения выбросов парниковых газов ее указали девять государств, включая Аргентину, Индию, Китай и Японию [6]. Стимулом для дальнейших подвижек может служить глобальная инициатива ядерной отрасли по программе «Гармония» под эгидой Всемирной ядерной ассоциации. По расчетам к 2050 г. ядерная генерация должна утроиться с тем, чтобы обеспечивать не менее 25% мировой выработки низкоуглеродной электроэнергии [7]. В стратегии аргументация в части роли АЭС в декарбонизации экономики не представлена, что является, на наш взгляд, заметным упущением.

Постановка глобальных экологических проблем и их решение неизбежны в ближайшие 10—20 лет. Сопrotивляющиеся полномасштабному развитию этих процессов крупные страны, такие, как США, Китай, а в некоторых случаях и Россия, явно переоценивают степень своей экономической и географической защищенности от трансграничных загрязнений. Один из регионов России, где проявятся трансграничные эффекты, — Дальний Восток. В этой связи интересны наблюдения, выполненные совместно со специалистами Дальневосточного федерального университета при поддержке Госкорпорации «Росатом» в 2017—2018 гг. В ходе организации экологического мониторинга в районах Дальнего Востока было проведено исследование тонкой структуры аэрозолей основных загрязнителей и точно определен источник их появления — промышленные объекты Китая. Вклад аэрозолей оказался больше вклада природных источников (пылевые аэрозоли засушливых зон и выбросы растений). Промышленные аэрозоли были обнаружены не только в приграничных районах Дальнего Востока, но и в Якутии, т.е. на удалении несколько тысяч километров от промышленных районов Китая. Полученные данные подтвердили серьезные опасения, изложенные ранее [8].

Тема промышленных аэрозолей, видимо, со временем потеснит многие иные экологические проблемы. Например, для европейского континента с этим видом выбросов эпидемиологи связывают сотни тысяч дополнительных смертей ежегодно [9, 10]. Кроме того, аэрозоли — это

основа образования облаков и, следовательно, осадков, и одна из причин изменчивости климата по аналогии с  $\text{CO}_2$ . Возвращаясь к ядерной энергетике, отметим, что она почти не выбрасывает аэрозоли. Это — еще одно мощное экологическое преимущество в дополнение к отсутствию выбросов парниковых газов и сжигания кислорода. К другим преимуществам следует отнести рачительное отношение к природным ресурсам, в том числе урану и воде, в замкнутом топливном цикле — практическая независимость от них.

Необходимо также формулировать, поддерживать и развивать тезисы о радиационной безопасности ядерной энергетике с учетом современных вызовов:

высокая эксплуатационная надежность АЭС с минимальным воздействием на окружающую среду региона размещения;

практические доказательства возможности реализации полного жизненного цикла объектов и материалов ядерной энергетике, в том числе с выводом из эксплуатации по варианту «зеленая лужайка» и надежным захоронением всех отходов. В отношении долгоживущих отходов высокого и среднего уровня активности уже существует высокая готовность к их окончательной изоляции с гарантиями безопасности или реализуются исследовательские программы, направленные на подтверждение долгосрочной безопасности захоронения;

высокий уровень культуры безопасности, выражающийся в том числе в наличии разветвленной системы проверок и чрезвычайно низких показателях травматизма работников в сравнении с другими отраслями энергетике и промышленности.

Отсутствие негативных последствий облучения при нормальной эксплуатации АЭС подтверждается агрегированными на мировом уровне результатами радиационно-эпидемиологических исследований (доклады НКДАР ООН [11]), сравнительным анализом рисков от радиации и химически вредных веществ [12, 13], данными об онкологической смертности населения, проживающего в регионах мира с повышенным уровнем облучения от природных источников, и жителей других территорий [14, 15], данными об онкологической смертности персонала современных атомных предприятий [16, 17]. Вместе с тем демонстрация безопасности ядерной

энергетики в общественном пространстве требует новых подходов, избавленных от накопленного негативизма общественного восприятия радиационных рисков. Аналогичным образом следует позиционировать ограниченность радиологических последствий всех крупных радиационных аварий. Завершая тему экологических и гуманитарных неопределенностей, констатируем, что тенденции их развития в значительной мере зависят от объема и качества предъявляемых обществу данных о проблемах безопасности для здоровья населения и окружающей среды. Стратегия, ориентированная на развитие ядерной энергетике, должна ясно указывать на необходимость работ по увеличению объема и доказательности материалов в этой области.

Отдельно следует остановиться на обращении с отработавшим ядерным топливом, радиоактивными отходами и выводом из эксплуатации АЭС. Сегодня это — один из ключевых аспектов общественного восприятия ядерной энергетике. К сожалению, в стратегии вопросы вывода энергоблоков из эксплуатации полностью отсутствуют. Вопросы обращения с отработавшим ядерным топливом и радиоактивными отходами изложены тезисно, в стиле, характерном для первых программ развития ядерной энергетике, где речь шла только о вводе энергоблоков в эксплуатацию, все остальное откладывалось «на потом». Эти обстоятельства в определенной мере удручают, поскольку прошло уже более 10 лет с начала масштабных работ по ядерному наследию и 8 лет с начала формирования правовых основ современной системы обращения с радиоактивными отходами, определенных соответствующим федеральным законом. Непосредственное участие авторов настоящей статьи в обосновании необходимости работ по наследию и последующем их информационном сопровождении, равно как и в формировании замысла закона о радиоактивных отходах, позволяет утверждать об исходной недооценке накопленных проблем и трудностей адаптации организаций Госкорпорации «Росатом» к условиям функционирования в логике полного жизненного цикла объектов и материалов [18]. Определенные риски в этой сфере, которые прогнозировались на начальной фазе формирования Единой государственной системы обращения с радиоактивными отходами, от-

части уже реализовались [19, 20]. В то же время Единая государственная система обращения с радиоактивными отходами обрела необходимые компоненты, и сегодня есть все основания утверждать, что она функционирует, по многим направлениям имеются четкие планы развития [21]. В специально созданном научно-техническом журнале «Радиоактивные отходы» развернуто научное обсуждение проблем и достижений в этой области.

С точки зрения разработчиков стратегии ограниченное рассмотрение вопросов обращения с отработавшим ядерным топливом, радиоактивными отходами и вывода из эксплуатации АЭС выглядит логичным: стратегия определила варианты контуры развития реакторного парка, все остальное — и производство топлива, и обращение с отработавшим ядерным топливом и радиоактивными отходами, в том числе тип рецикла — будет подстраиваться под реакторные технологии. Авторы настоящей статьи придерживаются иной точки зрения — вопросы обращения с отработавшим ядерным топливом, радиоактивными отходами и вывода из эксплуатации АЭС определяют общественную и экологическую приемлемость ядерной энергетики и ее конкурентоспособность в настоящем и будущем. В этой связи представляется важным зафиксировать в обеспечение реализации стратегии как минимум два условия, требуемые для развития ядерной энергетики и сохранения ее потенциала в части строительства АЭС за рубежом:

1. Необходимость понимания развития в полном цикле, т.е. не только в форме графика ввода новых мощностей, но и начала и завершения работ по выводу из эксплуатации энергоблоков и захоронению радиоактивных отходов, в том числе от переработки отработавшего топлива. Новые энергоблоки должны номинироваться как стопроцентно высокэкологичные, т.е. с просчитанным завершением жизненного цикла самого энергоблока, переработкой отработавшего топлива и захоронением радиоактивных отходов. Содержание стратегии и обосновывающих материалов не дает уверенности, что в примененном критерии LCOE это учтено в полной мере;

2. Необходимость увязки этапов развития ядерной энергетики и формирования Единой государственной системы обращения с радиоак-

тивными отходами. Взаимная увязка необходима по многим крупным и неотложным вопросам. Пять из них подробно рассмотрены в работе [22]. Остановимся на первых трех.

1. Тепловыделение остеклованных отходов. До последнего времени технология остекловывания радиоактивных отходов от переработки отработавшего топлива реализовывалась в нашей стране только в ПО «Маяк». Тепловыделение стекла позволяло осуществлять его захоронение после некоторой выдержки или без нее. В настоящее время в Опытном-демонстрационном центре по переработке отработавшего топлива на Горно-химическом комбинате запускается новая установка с более высокими параметрами тепловыделения. Возникает вопрос о том, как будет перерабатываться отработавшее топливо — в порядке поступления или более организованно, как это предлагается в работе [23]. Это очень простой, но наглядный пример долгосрочной состыковки деятельности по различным направлениям — в данном случае речь идет о таких сроках начала захоронения боросиликатного стекла, как 2050—2060 гг. Близкая ситуация с пуском технологий опытно-демонстрационного энергокомплекса БРЕСТ-300, где также будет сформирован новый поток радиоактивных отходов, который даже с учетом фракционирования на первых этапах потребует геологического захоронения [24].

2. Реакторный графит. В рамках действующих норм реакторный графит отнесен к отходам класса 2. Дороговизна такого захоронения хорошо понимается всеми. При этом есть предпосылки для обоснования возможности захоронения графита на существенно меньшей глубине. Важно своевременное решение по поиску подходящей площадки. Другие варианты — глубинное захоронение графита или его дополнительное хранение, или продолжение текущей практики содержания графитовых кладок РБМК — гораздо более затратны.

3. Захоронение жидких отходов. Уже сегодня, помимо дискуссий в МАГАТЭ о приемлемости закачки таких отходов, есть пример увязки ее прекращения с заключением крупных международных контрактов. В АО «Сибирский химический комбинат», например, в обеспечение заключения такого контракта сооружается комплекс отверждения радиоактивных отходов. Несмотря на принимаемые меры в обоснование

признания практики закачки безопасной, ее перспективы ограничены [25]. Тем не менее эксплуатирующими организациями, поставляющими жидкие отходы на захоронение, в том числе Горно-химическим комбинатом и Научно-исследовательским институтом атомных реакторов, до конца не осознана серьезность требований по закрытию пункта глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов в контексте международной деятельности и экспорта технологий, в частности, строительства АЭС за рубежом и переработки зарубежного отработавшего топлива.

Помимо перечисленных неотложных вопросов, есть и более отдаленные задачи в части согласования. В настоящее время важно определить срок, когда надо будет начинать детализированную проработку взаимоувязки развития новых реакторных технологий и соответствующей трансформации Единой государственной системы захоронения радиоактивных отходов. В качестве такого срока предлагается определить прохождение предусмотренных стратегией технологических развилок, первой из которых, вероятно, следует принять опыт эксплуатации реакторной установки БРЕСТ-ОД-300, т.е. на рубеже после 2030 г. Успехи в развитии технологий будут сигналом к детальному рассмотрению трансформации систем обращения с отработавшим топливом и радиоактивными отходами.

Остановимся на еще одном моменте, связанном с окончательной изоляцией отходов. Объем накопленных отходов, существующий и сооружаемый парк реакторных установок и ядерных технологий предопределяют необходимость создания и функционирования на протяжении многих десятилетий полномасштабной системы захоронения всех типов отходов [4, 5]. Эта политика поддерживается на государственном уровне во всех странах, ратифицировавших Объединенную конвенцию о безопасности обращения с отработавшим топливом и безопасности обращения с радиоактивными отходами, и признается большинством специалистов мира и России. Но в стратегии представлено иное мнение. В ней указано, что «безопасность захоронения РАО на сотни тысяч и миллионы лет вызывает вполне обоснованные сомнения относительно надежности столь долговременных прогнозов».

Подобный тезис вызывает возражение по двум причинам. Во-первых, он полностью игнорирует тот факт, что в мире образуется беспримерно много особо опасных отходов, которые стабильны, при этом их захоронение сильных возражений не вызывает. Поэтому долгоживущие отходы нужно позиционировать как отходы, не в полной мере обладающие положительным свойством радиоактивного распада в течение нескольких столетий, но которые все же лучше, чем стабильные опасные отходы. Во-вторых, подобный тезис подрывает убежденность в экологических преимуществах ядерной энергетики. Вопросы обоснования долговременной безопасности в настоящее время решаются с применением передовых научных методов и с высоким уровнем международной кооперации и открытости.

В заключение укажем, что стратегия должна быть дополнена публичными документами относительно технической политики или сроков ее рассмотрения по всем горячим темам завершающих стадий жизненного цикла. Таких важных тем много, причем по многим из них отсутствуют научная литература и публичные документы, что может быть истолковано как откладывание проблем на будущее. Среди таких тем — предельные сроки хранения отработавшего топлива РБМК-1000 и ВВЭР-1000, образование отходов на АЭС России, включая АЭС, построенные по новым проектам, в том числе в сравнении с зарубежными аналогами, сроки и стоимость вывода из эксплуатации существующих и вновь сооружаемых энергоблоков АЭС, стратегия и сроки вывода из эксплуатации Билибинской АЭС и др. Частный характер некоторых из них не исключает возникновения широкомасштабной дискуссии в будущем, в том числе в контексте развития ядерной энергетики. Можно привести пример, когда появление подобного рода документа во многом упрощало обсуждение проблемы среди специалистов и общественности, — это сооружение первоочередных объектов пункта захоронения глубинного типа. Неоднозначность наименования проекта, которое могло обозначать его быстрое создание, инициировала определенную региональную напряженность и значительный объем вопросов со стороны иных стран в ходе обсуждения Национального доклада Российской Федерации по исполнению обязательств, вытекающих из

Объединенной конвенции. Публикация стратегии создания пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов, ясно позиционирующей этапы работ [26], в том числе создание и эксплуатацию подземной исследовательской лаборатории в период до 2030 г., полностью эти вопросы сняла.

Таким образом, формирование долгосрочной стратегии развития ядерной энергетики России вышло на принципиально новый уровень — в конце 2018 г. одобрен базовый документ [1]. Сосредоточенность стратегии на базовых реакторных технологиях обусловила наличие в ней пробелов, в том числе по таким направлениям, как завершающие стадии жизненного цикла, обоснование экологической приемлемости и экологические стимулы для развития.

Выявленные пробелы должны быть закрыты путем кропотливого рассмотрения всех инфраструктурных вопросов, сопровождающих сооружение и эксплуатацию АЭС, в том числе обращения с отработавшим топливом, радиоактивными отходами и вывода АЭС из эксплуатации и их обобщения в аналитических материалах и документах. Для подготовки анализа с условным названием «Инфраструктурное обеспечение двухкомпонентной ядерной энергетики России» потребуется время. Видение будущего облика для базового сценария развития на период до прохождения технологических развилок может быть сформировано за 2—3 года. После этого и с последующим прохождением предусмотренных стратегией технологических развилок станет возможно развитие видения инфраструктуры двухкомпонентной ядерной энергетики.

Необходимо также формирование еще одного документа с условным названием «Экологическое обоснование развития ядерной энергетики России и гуманитарные аспекты».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Стратегия** развития ядерной энергетики России до 2050 года и перспективы на период до 2100 года. М., Госкорпорация «Росатом», 2018. 62 с.
2. **Основные** направления исследований в области безопасности атомной энергетики. Результаты работ за 1988—2018 гг. Под общ. ред. Л.А. Большова. М., ИБРАЭ РАН, 2018. 240 с.

3. **Алексеев П.Н., Гагаринский А.Ю., Калугин М.А. и др.** К стратегии развития ядерной энергетики России. — Атомная энергия, 2019, т. 126, вып. 4, с. 183—187.
4. **Программа** инновационного развития и технологической модернизации Госкорпорации «Росатом» на период до 2030 г. М., Госкорпорация «Росатом», 2016.
5. **The Future of the Nuclear Fuel Cycle.** An Interdisciplinary MIT Study. Massachusetts Institute of Technology, 2011. 237 p.
6. **Кувалдин С.** Атомная энергетика и противодействие изменению климата в контексте Парижского климатического соглашения. — Индекс безопасности, 2019, т. 22, № 3—4(118—119), с. 43—54.
7. <https://www.world-nuclear.org/harmony>. Дата обращения 05.09.2019.
8. **Кондратьев И.И.** Трансграничный атмосферный перенос аэрозоля и кислотных осадков на Дальний Восток России. Владивосток: Дальнаука, 2014. 300 с.
9. **Beelen R., Raaschou-Nielsen O., Stafoggia M. e.a.** Effects of long-term exposure to air pollution on natural-cause mortality: an analysis of 22 European cohorts within the multicentre ESCAPE project. — Lancet, 2014, v. 383, p. 785—795.
10. **Lelieveld J., Klingmüller K., Pozzer A. e.a.** Cardiovascular disease burden from ambient air pollution in Europe reassessed using novel hazard ratio functions. — European Heart J., 2019, v. 40, № 20, p. 1590—1596.
11. **Radiation** Exposures from Electricity Production. Scientific Annex B to UNSCEAR 2016 Rep. Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation. United Nations. New York, January 2017, p. 135—240.
12. **Mukherjee R.** Comparative biological hazards of chemical pollutants and radiation. — IAEA Bull., 1978, v. 20, № 3, p. 31—38.
13. **Арутюнян Р.В., Воробьева Л.М., Панченко С.В. и др.** Сопоставительный анализ радиационных и химических рисков для здоровья населения Красноярского края. — Радиация и риск, 2014, № 2, с. 123—136.
14. **Dobrzyński L., Fornalski K., Feinendegen L.** Cancer mortality among people living in areas with various levels of natural background radiation. — Dose Response, 2015, v. 13 (3). doi: 10.1177/1559325815592391.
15. **Hendry J., Simon S., Wojcik A. e.a.** Human exposure to high natural background radiation: what can it teach us about radiation risks? — J. Radiological Protection, 2009, v. 29(0), p. A29—A42. doi: 10.1088/0952-4746/29/2A/S03.
16. **Health** Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation. BEIR VII Phase 2. Chapter 8. Occupational Radiation Studies. Washington: National Academies Press, p. 189—206.
17. **Wakeford R.** Nuclear worker studies: promise and pitfalls. — J. Cancer, 2014, v. 110 (1), p. 1—3.
18. **Проблемы** ядерного наследия и пути их решения. Т. 1. Под общ. ред. Е.В. Евстратова, А.М. Агапова, Н.П. Лаверова, Л.А. Большова, И.И. Линге. М., ОАО «Энергопроманистика», 2012. 356 с.

19. Большов Л.А., Линге И.И., Уткин С.С. и др. Становление национальной системы обращения с радиоактивными отходами: уроки, успехи, ожидания. — Атомная энергия, 2011, т. 111, вып. 3, с. 126—131.
20. Дорофеев А.Н., Линге И.И., Самойлов А.А. и др. К вопросу финансово-экономического обоснования повышения эффективности нормативной базы ЕГС РАО. — Радиоактивные отходы, 2017, № 1, с. 22—31.
21. Абрамов А.А., Дорофеев А.Н. Современное состояние и перспективы развития системы обращения с РАО в Российской Федерации. — Там же, 2017, № 1, с. 10—21.
22. Большов Л.А., Линге И.И. О согласовании этапов развития атомного энергопромышленного комплекса и системы обращения с РАО. — Там же, 2019, № 3(8), с. 24—27.
23. Блохин П.А., Дорофеев А.Н., Линге И.И. и др. О возможностях управления характеристиками боросиликатного стекла при переработке ОЯТ ВВЭР-1000 на ОДЦ «ГХК». — Там же, 2019, № 2 (7), с. 49—57.
24. Кашеев В.А., Шадрин А.Ю. Обращение с РАО от переработки смешанного нитридного уран-плутониевого ОЯТ. Тезисы докл. IX конф. «Радиохимия 2018». Санкт-Петербург, 2018, с. 394.
25. Дорофеев А.Н., Савельева Е.А., Уткин С.С. и др. Эволюция обоснования долговременной безопасности ПГЗ ЖРО. — Радиоактивные отходы, 2017, № 1, с. 55—64.
26. Стратегия создания пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов. — Там же, 2018, № 2(3), с. 114—120.

Поступила в Редакцию 19.09.19

УДК 658.005

## ИНТЕГРАЦИЯ ПРОЦЕССА РАСЧЕТНОГО ОБОСНОВАНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК В ЕДИНОЕ ИНФОРМАЦИОННОЕ ПРОСТРАНСТВО ДЛЯ СОЗДАНИЯ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ЯЭУ

*Белокрылов П.Ю., Большухин М.А., Комиссаров К.В., Петрунин В.В., Повереннов Е.Ю.*

*(АО «ОКБМ Африкантов», г. Нижний Новгород)*

*e-mail: komissarov@okbm.nnov.ru*

АО «ОКБМ Африкантов» владеет передовыми технологиями и занимает ведущие позиции в создании ЯЭУ различного типа и назначения: ЯЭУ атомных ледоколов и судов, плавучие атомные теплоэлектростанции (ПАТЭС), атомные станции малой мощности (АСММ), быстрые реакторы с натриевым теплоносителем, промышленные и высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы. Для таких сложных и наукоемких объектов характерны индивидуальные особенности, а также повышенные требования безопасности и высокие параметры рабочих сред на протяжении всего жизненного цикла ЯЭУ от начала проектирования и до утилизации.

На стадии жизненного цикла «проектирование ЯЭУ» основным направлением является научно-техническое обоснование проекта с применением современного программного обеспечения. Программное обеспечение позволяет моделировать системы управления, проводить численные исследования нейтронной физики, гидродинамики, тепломассопереноса и напряженно-деформированного состояния, а также анализировать поврежденность элементов конструкции ЯЭУ с учетом конкретных условий работы и действующих нагружающих факторов,

влияющих на деформирование материала и деградацию его прочностных характеристик.

Одним из направлений развития исследований являются численные эксперименты в составе цифрового двойника (рис. 1). Численные эксперименты [1], входящие в состав цифрового двойника, — это сложные мультидисциплинарные математические модели с высоким уровнем соответствия реальным материалам/объектам/конструкциям/техническим системам/физико-механическим процессам, включая технологические и производственные процессы, описываемые 3D-нестационарными нелинейными дифференциальными уравнениями в частных производных, обеспечивающих минимальное отличие между результатами виртуальных и натуральных испытаний.

В АО «ОКБМ Африкантов» разрабатывается технология создания цифрового двойника ЯЭУ, которая базируется на комплексе программного и аппаратного обеспечения, интегрированного в единое информационное пространство и обеспечивающего взаимосвязанные численные исследования, по расчету разных сложных физических процессов и верифицированных данных по описанию поведения конст-