

УЧЕТ ОСОБЕННОСТЕЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ РЕАКТОРОВ С ТОПЛИВОМ В ВИДЕ РАСПЛАВОВ СОЛЕЙ ЯДЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ТРЕБОВАНИЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Курындин А.В., Киркин А.М., Синегрибов С.В., Бучихин М.А., Савёлов С.А.
(ФБУ «НТЦ ЯРБ», Москва, Россия)

Введение

В связи с накоплением большого количества радиоактивных отходов [1], представляющих серьезную долговременную потенциальную опасность для окружающей среды и здоровья человека, в мировом атомном сообществе активно ведутся работы по разработке технологий утилизации радиоактивных отходов, не требующих выдержки в специализированных хранилищах в течение геологически значимого времени [1]. Важно отметить, что уменьшение количества долгоживущих радиоактивных отходов является также одной из задач устойчивого развития ядерной энергетики [2, 3]. Одним из перспективных направлений по уменьшению долгоживущих радиоактивных отходов является применение в ядерном топливном цикле концепции «разделение и трансмутация», которая предполагает выделение из отработавшего топлива фракций минорных актинидов и их трансмутацию.

Для трансмутации минорных актинидов может быть использован любой источник нейтронов, в то время как использование протонных и гамма-реакций нецелесообразно [4]. Проведенные исследования показали наличие высоких экономических издержек при использовании подкритических электроядерных установок [1], а добавление минорных актинидов в топливо гетерогенных реакторов приводит к значительному увеличению их количества в топливном цикле, что в свою очередь приводит к усложнению технологических операций с ядерным топливом и требует дополнительных мер по радиационной защите персонала [1]. В связи с этим одним из наиболее перспективных методов трансмутации минорных актинидов считается их добавление в топливо гомогенного жидкосолевого реактора (ЖСР) [1].

Государственной программой Российской Федерации «Развитие атомного энергопромышленного комплекса» [5] предусмотрены мероприятия по развитию технологий реакторов, использующих в качестве топлива расплав солей ядерных материалов, а также комплексов с такими реакторами, предназначенных для утилизации минорных актинидов. При этом на начальном этапе запланированы работы по созданию экспериментально-исследовательской базы, в том числе исследовательского ЖСР.

Создание нормативной правовой основы обеспечения безопасности таких новых перспективных объектов использования атомной энергии как ЖСР является одной из основных задач, которая позволит обеспечить высокий уровень безопасности активно внедряемых в настоящее время инновационных технологий [6, 7].

1. Реакторы с топливом в виде расплавов солей ядерных материалов

ЖСР обладают рядом особенностей, которые потенциально могут повысить уровень безопасности ядерной установки. В частности, в связи с жидким агрегатным состоянием ядерного топлива исключена возможность возникновения тяжелых аварий, связанных с плавлением ядерного топлива. Кроме того, использование расплава солей ядерных материалов обеспечивает внутреннюю самозащищенность за счет обратных связей, в том числе по температуре топливной соли, а также подкритичность реактора путем дренажа ядерного топлива из активной зоны в специальные баки, выполненные в безопасной геометрии. Так как топливо в ЖСР, как правило, может добавляться или изыматься по мере необходимости в процессе эксплуатации, запас реактивности для компенсации выгорания топлива может быть минимальным, что обеспечивает работу

в стационарных условиях практически без изменения реактивности активной зоны во времени [8]. Более того, конструкцией многих ЖСР предусматриваются системы удаления из топливной соли продуктов деления, что может значительно снизить активность в выбросе радиоактивных веществ в случае аварии [8, 9]. Также к преимуществам ЖСР следует отнести работу без значительного избыточного давления в активной зоне и топливном контуре, что уменьшает вероятность разрыва трубопроводов и разгерметизации топливного контура при эксплуатации ЖСР [8, 9]. Рассматриваемые в настоящее время топливные композиции (фториды) не могут приводить к паро- и газовыделению, которое могло бы привести к повышению давления и тем самым разрушить конструкцию реактора или защитную оболочку [10].

Как отмечено выше, одной из основных целей внедрения технологий ЖСР является трансмутация минорных актинидов. В том числе отдельные проекты ЖСР предполагают компенсацию выгорания ядерного топлива исключительно за счет добавления в топливный контур минорных актинидов (без ^{233}U , ^{235}U , ^{239}Pu и иных делящихся материалов) [10, 11]. В перспективе такие реакторы позволят минимизировать риски с точки зрения нераспространения ядерных материалов, а также позволят снизить потребление ограниченных запасов ископаемых делящихся материалов. В некоторых странах также планируют использовать технологии ЖСР для расширения ресурсной базы ядерной энергетики за счет дожигания топлива водородных реакторов и включения в топливный цикл тория [8]. В настоящее время за рубежом проекты ЖСР планируются к реализации в Китае, Канаде, Великобритании, Дании, Голландии и США, основная часть из которых ориентирована на генерацию тепло- и электроэнергии [8].

Несмотря на все преимущества ЖСР, до настоящего времени отсутствуют опыт эксплуатации ЖСР промышленного масштаба и положения, учитывающие специфические особенности реакторов такого типа в действующих нормативных документах. В частности, ряд действующих требований может быть неприменим к реакторам с топливом в виде расплава солей ядерных материалов, а отсутствие специфических требований в нормативных правовых актах может привести к недостаточному уровню обеспечения безопасности. Вышеизложенное приводит к дополнительным вопросам со стороны органов регулирования безопасности и рискам при прохождении процедуры лицензирования деятельности в отношении ЖСР.

2. Международные подходы к учету особенностей реакторов с топливом в виде расплавов солей ядерных материалов

Комиссия по ядерной безопасности Канады (далее – CNSC) в соответствии с Законом о безопасности и контроле за ядерной энергией [12], являясь органом регулирования безопасности, до начала процедуры лицензирования может проводить предварительную оценку проектов объектов использования атомной энергии. В настоящее время CNSC завершила ряд работ по предварительной оценке материалов нескольких проектов ЖСР.

Так, в 2016 году CNSC заключило договор с компанией Terrestrial Energy о проведении первого этапа предварительной оценки материалов проекта реактора IMSR400 с тепловой мощностью 400 МВт. По результатам работы CNSC опубликован Отчет [13], в котором приведены результаты оценки соответствия проекта IMSR400 требованиям, изложенным в REGDOC-2.5.2 [14], RD-367 [15] и других применяемых в Канаде нормативных документах и стандартах. Согласно Отчету [13], Terrestrial Energy продемонстрировала понимание требований CNSC, применимых к проектированию и анализу безопасности интегрального ЖСР IMSR400, а также учитывает уроки, извлеченные из аварии на АЭС Фукусима-1. В Отчете [13] также отмечено, что компании Terrestrial Energy требуется дополнительно рассмотреть выводы, сделанные в рамках

этой проверки, включая необходимость создания надежных процессов обеспечения качества для деятельности по проектированию и обеспечению безопасности.

С 2017 года CNSC в рамках договора с Moltex Energy проводился первый этап предварительной оценки документов проекта ЖСР SSR-W300 электрической мощностью 300 МВт (750 МВт (тепловых)). После 42 месяцев предварительной оценки представленной Moltex Energy документации сотрудниками CNSC выпущен Отчет [16], содержащий выводы о соответствии проектных решений SSR-W300 требованиям нормативных документов Канады. В Отчете [16], отмечено, что в целом компания Moltex Energy понимает и правильно истолковывает положения нормативных требований CNSC по проектированию атомных электростанций в Канаде.

Нормативная правовая база Канады является целеполагающей (содержит только обязательные требования высокого уровня и рекомендации по их соблюдению), и разделом 11 REGDOC-2.5.2 [14] предусмотрена возможность использования альтернативных подходов к соблюдению обязательных требований. В связи с этим для учета уникальных характеристик конструкции ЖСР компании Terrestrial Energy и Moltex Energy предлагают альтернативные подходы и методологии для выполнения требований нормативных документов CNSC. Компании Terrestrial Energy и Moltex Energy намерены в дальнейшем надлежащим образом обосновать, что использование альтернативных подходов приведет к эквивалентному или более высокому уровню безопасности установки по сравнению с использованием подходов, реализованных в классических ядерных установках [13, 16].

Аналогичные оценки в отношении жидкосолевых реакторов проводятся Комиссией по ядерному регулированию (далее – NRC) – органом регулирования безопасности США. В рамках анализа NRC учитывают не только требования действующих нормативных документов, но и предыдущий опыт рассмотрения обоснований безопасности аналогичных проектов, а также исследования научно-исследовательских и проектно-конструкторских институтов и лабораторий США.

В 2019 году Terrestrial Energy отправила в NRC пакет документов для проведения оценки материалов проекта реактора IMSR400 на соответствие требованиям Раздела 10 свода федеральных правил США (далее – 10 CFR). Terrestrial Energy был составлен Отчет [17], в котором представлены результаты обзора требований 10 CFR на предмет их применимости, достаточности или избыточности к реактору IMSR400. В Отчете [17] отмечено, что, поскольку многие из положений 10 CFR Part 50 [18] и 10 CFR Part 52 [19] были написаны для энергетических легководяных реакторов, они не могут во всем объеме применяться непосредственно к системам и элементам реактора IMSR400. В настоящее время процедура предварительного лицензирования проекта IMSR400 не завершена и компания Terrestrial Energy проводит периодические совещания, в рамках которых взаимодействует с экспертами NRC.

Институтом радиационной защиты и ядерной безопасности (IRSN), который является организацией научно-технической поддержки органа регулирования безопасности Франции, разработан Отчет [20], в котором представлен обзор ядерных энергетических установок поколения IV, а также особенности регулирования безопасности таких установок. В Отчете [20] IRSN рассмотрели особенности обеспечения безопасности установок с ЖСР, а также проанализировали возможные подходы к регулированию и разработке специфических нормативных требований и рекомендаций органа регулирования по обеспечению безопасности ЖСР.

В настоящее время специфические особенности обеспечения безопасности ЖСР также активно обсуждаются в международном сообществе широким кругом стран, заинтересованных в реализации таких технологий. В частности, в рамках целого ряда рабочих групп, технических и консультационных совещаний МАГАТЭ представители стран-участниц обсуждают вопросы применимости Норм безопасности МАГАТЭ

к инновационным реакторам и технологиям в области использования атомной энергии, в том числе к технологиям ЖСР [21]. Также в рамках Международного форума «Поколение IV» (Generation IV International Forum, GIF) осуществляется международное сотрудничество по развитию технологий шести инновационных концептов ядерных реакторов, одним из которых является ЖСР. В рамках GIF рабочие группы обмениваются актуальной информацией о проектировании инновационных установок и разрабатывают подходы к совершенствованию проектных решений как с точки зрения экономичности и оптимизации, так и с точки зрения обеспечения ядерной и радиационной безопасности и физической защиты [22]. В июне 2023 года состоялся совместный семинар МАГАТЭ и GIF, посвященный вопросам регулирования безопасности и обсуждению требований и руководств по безопасности реакторов без водяного охлаждения [23]. В рамках одной из технических сессий обсуждалась деятельность по направлению реакторов с расплавами солей ядерных материалов, в том числе проект документа МАГАТЭ серии TECDOC «Аспекты обеспечения безопасности высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов и реакторов с расплавами солей», разрабатываемый с конца 2022 года для обобщения опыта стран-участниц МАГАТЭ по вопросам обеспечения безопасности высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов и ЖСР.

3. Особенности реакторов с топливом в виде расплавов солей ядерных материалов, которые должны быть учтены при разработке требований безопасности

На основании выполненного анализа зарубежных [9, 24, 25, 26] и международных публикаций [8, 20, 21, 22, 23, 27] можно выделить следующие основные особенности ЖСР, которые должны быть учтены при разработке требований безопасности:

- физические барьеры на пути распространения радиоактивных веществ значительно отличаются от классических твердотопливных реакторов;
- высокая скорость реактивной обратной связи;
- вынос эмиттеров запаздывающих нейтронов из активной зоны;
- возможность затвердевания ядерного топлива;
- высокое остаточное тепловыделение ядерного топлива;
- возможность изменения нуклидного состава ядерного топлива в процессе работы реактора (за счет удаления/добавления ядерного топлива и/или систем очистки);
- высокая интенсивность образования трития в несущих солях, содержащих литий;
- возможность образования газообразного гексафторида урана при нагреве солей, содержащих фтор.

С учетом описанных в [23, 26, 27] проектных и конструкторских решений ЖСР, а также применяемых в ЖСР технологий, целесообразно отметить возможность наличия в проектах ЖСР специфических мер:

- по контролю герметичности оборудования топливного контура (в особенности циркуляционного насоса), аналогичные мерам по контролю герметичности твэлов;
- предотвращению образования застойных зон и локальных контуров естественной циркуляции в топливном контуре;
- обеспечению равномерного нагрева ядерного топлива в топливном контуре;
- снижению коррозии и эрозии конструкционных материалов при контакте с высокотемпературным расплавом солей;
- поддержанию температурного режима ядерного топлива в сливных баках системы аварийного удаления ядерного топлива из топливного контура;
- недопущению накопления локальной критической массы делящихся материалов в трубопроводах и оборудовании топливного контура и системах хранения ядерного топлива;

- обеспечению достаточного уровня теплостойкости и термостойкости конструкционных материалов с учетом температурного режима ядерного топлива;
- контролю запаса реактивности и нуклидного состава ядерного топлива в любой момент кампании;
- учету возможного влияния скорости прокачки ядерного топлива через активную зону на управление реактивностью ЖСР;
- обеспечению слива топливной соли преимущественно за счет систем и элементов пассивного принципа действия;
- предотвращению затвердевания топливной соли в топливном контуре при нормальной эксплуатации и при нарушениях нормальной эксплуатации ЖСР (до проектных аварий);
- охлаждению выделяющихся из ядерного топлива газообразных продуктов деления;
- снижению дозовой нагрузки на персонал при проведении работ с оборудованием топливного контура, в том числе за счет применения средств автоматизации и роботизации.

На основании анализа [9, 10, 24] следует отметить необходимость обеспечения (насколько это практически возможно) следующих характеристик топливной соли:

- низкая температура плавления и большой температурный диапазон жидкой фазы;
- высокие коэффициент теплопроводности и теплоемкость;
- низкая вязкость;
- высокий коэффициент расширения;
- низкая способность поглощения нейтронов несущей соли;
- высокая радиационная стойкость;
- низкая коррозионная и эрозионная активность.

4. Учет особенностей исследовательских реакторов с топливом в виде расплавов солей ядерных материалов в нормативной правовой базе Российской Федерации

В соответствии с целями и задачами Государственной программы Российской Федерации «Развитие атомного энергопромышленного комплекса» [7] запланировано сооружение исследовательского ЖСР, предназначенного для отработки технологии дожигания долгоживущих изотопов отходов ядерной энергетики. Реактор должен стать прототипом полномасштабного ЖСР для трансмутации минорных актинидов в промышленных масштабах.

По результатам выполненных в период 2020–2022 гг. ФБУ «НТЦ ЯРБ» работ по анализу проектных материалов исследовательского ЖСР (на ранних стадиях разработки), а также анализу зарубежного и международного опыта обеспечения и регулирования безопасности ЖСР, выявлен ряд потенциальных проблем регулирования безопасности. На основании выполненного анализа совместно с разработчиком проекта исследовательского ЖСР (АО «НИКИЭТ») разработан и согласован с Ростехнадзором План разработки (переработки, актуализации) нормативных документов, регламентирующих вопросы безопасности исследовательских ядерных установок с жидкосолевыми ядерными реакторами (далее – План). План способствует своевременной разработке новых и внесению изменений в действующие нормативные документы регулирования безопасности исследовательских реакторов с растворами и расплавами солей ядерных материалов. В первую очередь, Планом предусмотрена разработка требований по обеспечению ядерной безопасности исследовательских реакторов с расплавами и растворами солей ядерных материалов, а также внесение изменений в федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Общие положения обеспечения

безопасности исследовательских ядерных установок» (НП-033-11) и «Требования к содержанию отчета по обоснованию безопасности исследовательских ядерных установок» (НП-049-17). При разработке перечисленных в Плане нормативных документов будут учтены характерные особенности проектов ЖСР, в том числе приведенные в разделе 3 настоящей публикации.

Заключение

Технологии ЖСР являются одним из наиболее перспективных направлений развития технологий в области использования атомной энергии. Значительные отличия в конструкции и основных целях эксплуатации ЖСР приводят к необходимости совершенствования нормативной правовой базы в области использования атомной энергии с учетом особенностей ЖСР. Совершенствование нормативной правовой базы параллельно с развитием инновационных технологий будет способствовать как повышению уровня безопасности разрабатываемых технологий, так и сокращению сроков проектирования, обоснования безопасности, проведения экспериментальных исследований и последующего сооружения ядерных установок.

Список литературы

1. Синергетические взаимодействия региональных групп стран с ядерной энергетикой, оцененные с позиций устойчивости (SYNERGIES). Обзор заключительного отчета / INPRO IAEA, Вена, 2019.
2. Our Common Future: Report of the World Commission on Environment and Development // World Commission on Environment and Development. – Oxford Paperbacks, 1987.
3. Будущее, которого мы хотим. Итоговый документ Конференции ООН по устойчивому развитию. – Рио-де-Жанейро, Бразилия. ООН, 2012. – 66 с.
4. The Minor Actinide Transmutation-Incineration Potential Studies in High-Intensity Neutron Fluxes / A. Letourneau, I. Almahamid, C. Blandin, S. Chabod [et al] // International conference on nuclear data for science and technology. – 2005. – Vol. 769. – № 1. – pp. 1509–1512.
5. Постановление Правительства РФ от 02.06.2014 № 506-12 «Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Развитие атомного энергопромышленного комплекса» // <http://www.consultant.ru>
6. Создание и совершенствование регулирующей основы безопасности при использовании атомной энергии / А. В. Ферапонтов, А. А. Хамаза, Р. Б. Шарафутдинов [и др.] // Ядерная и радиационная безопасность. – 2022. – № 2(104). – С. 5–30.
7. Рекомендации «круглого стола» Комитета Государственной Думы по энергетике на тему «Законодательное регулирование ядерных энерготехнологий нового поколения». Томск, 12 июля 2019 г.
8. Advances in Small Modular Reactor Technology Developments, 2022 Edition – International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria, 2022.
9. Fuel Qualification for Molten Salt Reactors (NUREG/CR-7299, ORNL/TM-2022/2754) / Oak Ridge National Laboratory; D. Holcomb, W. Poore, G. Flanagan. – Oak Ridge: U.S. Nuclear Regulatory Commission, 2022 – 79 p.
10. Жидкосолевой реактор для замыкания ядерного топливного цикла по всем актиноидам / В.В. Игнатьев, М.В. Кормилицын, Л.А. Кормилицына [и др.] // Атомная энергия. – 2018. – Т. 125, № 5. – С. 251–255
11. О трансмутации минорных актиноидов в жидкосолевом реакторе-сжигателе / М.Н. Белоногов, И.А. Волков, Д.Г. Модестов [и др.] // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2021. – № 4. – С. 18–27.

12. Nuclear Safety and Control Act of Statutes of Canada 20.03.1997 c. 9 // <http://www.gc.ca>
13. Phase 1 Executive Summary: Pre-Project Review of Terrestrial Energy Inc. Integral Molten Salt Reactor-400. – Canadian Nuclear Safety Commission, 2017. // <http://www.nuclearsafety.gc.ca>
14. REGDOC-2.5.2, Design of Reactor Facilities: Nuclear Power Plants. – Canadian Nuclear Safety Commission, 2014. // <http://www.nuclearsafety.gc.ca>
15. RD-367, Design of Small Reactor Facilities. – Canadian Nuclear Safety Commission, 2011. // <http://www.nuclearsafety.gc.ca>
16. Phase 1 pre-licensing vendor design review executive summary: Moltex Energy. – Canadian Nuclear Safety Commission, 2021. // <http://www.nuclearsafety.gc.ca>
17. USA Examination of Regulatory Requirements to Determine Exemption Needs for the IMSR Core-unit // TEUSA Documents. – #:200825. – 2020.
18. U.S. Code of Federal Regulations, «Domestic Licensing of Production and Utilization Facilities». – Part 50, Chapter I, Title 10, «Energy». // <https://www.nrc.gov>
19. U.S. Code of Federal Regulations, «Licenses, Certifications, and Approvals for Nuclear Power Plants». – Part 52, Chapter I, Title 10, «Energy». // <https://www.nrc.gov>
20. Review of Generation IV Nuclear Energy Systems / IRSN. – France, 2015. – 239 p.
21. Safety Report on Applicability of Safety Standards to Non-Water-Cooled Reactors and Small Modular Reactors // IAEA Safety Reports Series. – №123 – Vienna, Austria. – 2022.
22. Gen IV International Forum: Annual Report. – 2021. // https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_44720/annual-reports
23. International Atomic Energy Agency [Электронный ресурс]: Joint IAEA – GIF Workshop on the Safety of Non-Water Cooled Reactors. 2023. URL: <https://www.iaea.org/events/evt2204905>
24. Haubenrich P.N. Experience with the molten-salt reactor experiment/ Haubenrich P.N., Engel J.R. // Nucl. Appl. Technol. – 1970. – V. 8. – I. 2. – pp. 118–136.
25. Technical Letter Report on The Assessment of Tritium Detection and Control in Molten Salt Reactors / Sebrosky J., Vechioli L., Madni I. // ANL/NSE-20-15 – U.S. Nuclear Regulatory Commission, 2020.
26. Brovchenko M. Design-Related Studies for the Preliminary Safety Assessment of the Molten Salt Fast Reactor / M. Brovchenko, D. Heuer, E. Merle-Lucotte, M. Allibert, V. Ghetta, A. Laureau and P. Rubiolo // Nuclear Science and Engineering, 2013. – Vol. 175. – I 3. – pp. 329–339.
27. R.P. Rulko Regulatory Design Evaluation of Advanced Reactors in Canada. // Consultancy on Safety of Sodium Cooled Fast Reactors. –, IAEA, 2015, – e-Docs # 4675974.