

ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ОБЛИК РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ С ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИМ ЖИДКОСОЛЕВЫМ РЕАКТОРОМ

Горячих А.В., Зайко И.В., Клименко Д.С., Ларионов И.А., Семченков А.А.,
Огнерубов Д.А., Романова Н.В., Третьяков И.Т., Лопаткин А.В.
(АО «НИКИЭТ», Москва, Россия)

Введение

Разработка реакторной установки (РУ) с исследовательским жидкосолевым реактором (ИЖСР) ведется в рамках Комплексной программы «Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии в Российской Федерации на период до 2024 года и демонстрация ключевых технологических решений по реактору с циркулирующим топливом на основе расплава фторидов металлов для трансмутации долгоживущих актинидов».

РУ ИЖСР должна стать источником референтных технологических решений для создания жидкосолевого реактора – сжигателя, предназначенного для утилизации долгоживущих минор-актинидов из отработавшего ядерного топлива энергетических реакторов [1]. РУ должна продемонстрировать и на практике отработать набор ключевых технологий, обеспечивающих безопасную и надежную эксплуатацию жидкосолевого реактора, и расширить верификационную базу экспериментальных данных для проверки достоверности расчетных кодов.

Совместно с реакторной установкой ИЖСР разрабатывается технология переработки жидкосолевого топлива, основанная на методе окислительно-восстановительной экстракции жидким металлом из солевого расплава.

В проект научной программы использования ИЖСР входят следующие задачи:

- 1) технология рабочего процесса
 - отработка технологии жидкосолевого топлива,
 - подтверждение надежности оборудования топливного контура,
 - подтверждение надежности КИП, систем управления, вспомогательных систем;
- 2) физические исследования
 - измерение нейтронно-физических характеристик и их пространственных распределений, эффектов реактивности и др.
 - исследование влияния на нейтронно-физические характеристики изменений в составе топливной соли в процессе эксплуатации;
- 3) исследования топливных циклов
 - исследования режимов подпитки при выгорании топлива,
 - отработка системы переработки топливной соли,
 - подбор оптимальных режимов использования топлив на основе плутония и минор-актинидов,
 - переход между режимами;
- 4) материаловедческие эксперименты
 - исследования взаимодействия топливной композиции с КМ,
 - исследование радиационной стойкости элементов контура циркуляции,
 - исследование характера выпадения «благородных» ПД на поверхности контура.

В эскизном проекте определены основные технические характеристики ИЖСР:

- тепловая мощность 10 МВт,
- топливная соль $73\text{LiF}-27\text{BeF}_2 + (\text{PuF}_3 + \text{AnFm})$,
- температура на входе в реактор 664 °С,
- температура на выходе из реактора 700 °С,
- кандидатные конструкционные материалы– хром-никелевые сплавы.

1. Облик РУ

В 2021–2022 гг. в составе эскизного проекта разработан реактор, контура теплоотвода (в том числе аварийного), оборудование контуров теплоотвода.

Реактор ИЖСР (рис. 1) представляет собой закрытый крышкой сосуд с размещенной в нем активной зоной и внутрикорпусными устройствами. Активная зона ограничена верхним, нижним и боковым отражателями, и состоит из полости, заполненной расплавом топливной соли, каналов и рабочих органов СУЗ, экспериментальных каналов.

В днище корпуса реактора предусмотрен патрубок дренажа.

Для организации циркуляции корпус реактора оборудован входным и выходным патрубками, движение соли через активную зону происходит снизу-вверх.

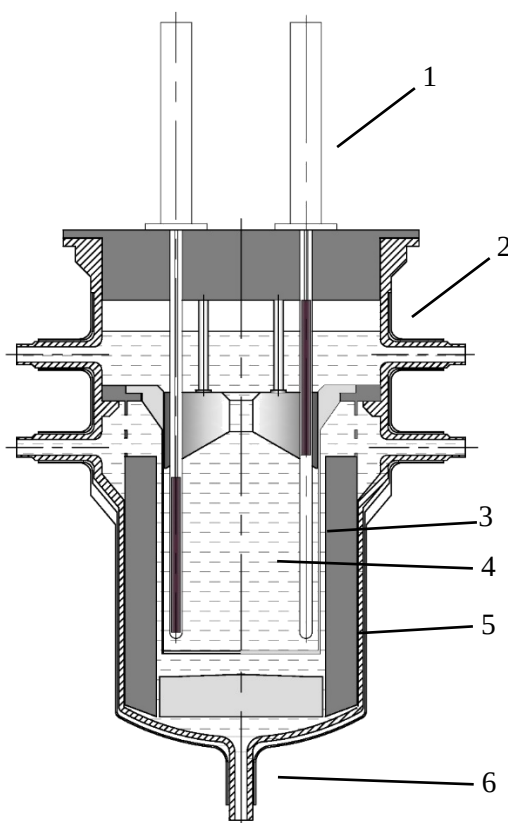


Рис. 1. Схема реактора ИЖСР:

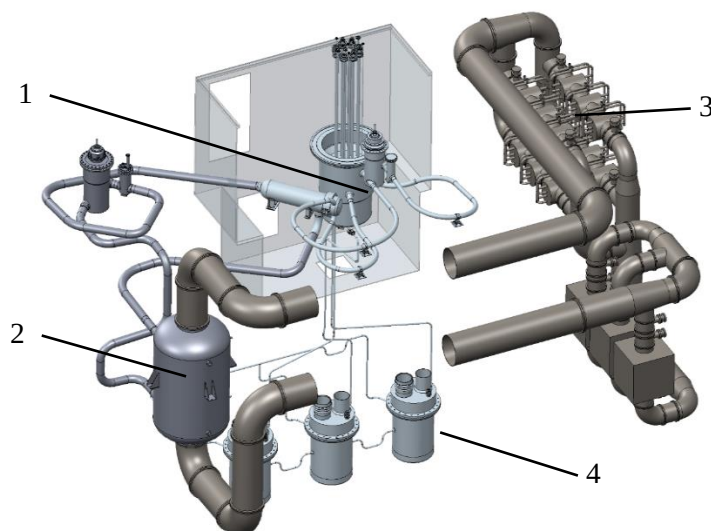
- 1 – исполнительный механизм системы управления и защиты;
2 – корпус реактора; 3 – рабочий орган системы управления и защиты;
4 – активная зона; 5 – отражатель; 6 – дренаж

Общий вид реакторной установки приведен на рис. 2.

Отвод тепла от реактора осуществляется тремя контурами: топливным, промежуточным и газовым. Теплоносителем топливного контура является топливная соль, промежуточного – соль молярного состава $66\text{LiF} - 34\text{BeF}_2$, газового – азот.

В составе контуров теплоотвода предусмотрены циркуляционные насосы и теплообменное оборудование.

Для слива топливной соли при проведении обслуживания контуров, а также в аварийных ситуациях предусмотрены дренажные баки, расположенные под реактором. Слив топливной соли в аварийных ситуациях происходит в результате разморозки соли в клапанах, установленных на дренажных трубопроводах.



*Рис. 2. Схема реакторной установки ИЖСР:
1 – топливный контур; 2 – промежуточный контур; 3 – газовый контур;
4 – система пассивного слива топливной соли*

Важным аспектом концепции ИЖСР является выбор конструкционного материала. Рассматриваются различные варианты основного конструкционного материала РУ: модификации на основе никелевого сплава. Выбор конкретной модификации материала будет сделан на основании серии исследований, включающих определение физико-механических свойств, технологичности материала, коррозионных и реакторных испытаний.

Оборудование РУ ИЖСР, содержащее топливную соль, размещено внутри герметичных боксов, ввиду высоких дозовых нагрузок для обслуживания этого оборудования разрабатывается система дистанционного обслуживания, включающая робототехнический комплекс. Доступ робототехнических комплексов в герметичные боксы осуществляется через шлюзы, а перемещение внутри боксов – по путям, проложенным вдоль обслуживаемого оборудования. Робототехнические комплексы имеют в своем составе манипулятор и сменные модули, позволяющие осуществлять операции по работе с контрольно-измерительными приборами, перемещению грузов, захвату и расцеплению предметов, демонтажу нагревателей и теплоизоляции, резке и сварке, монтажу/демонтажу оборудования, неразрушающему контролю.

2. Расчетное обоснование принятых решений

В эскизном проекте выполнена оптимизация конструкции реактора и топливного контура с целью увеличения удельной энергонапряженности в соли топливного контура, поскольку она определяет эффективность трансмутации минор-актинидов (МА) в реакторе, а также скорость процессов образования продуктов деления (ПД), которые в свою очередь являются важными параметрами при реализации научной программы использования ИЖСР. В результате оптимизации удельное энерговыделение повышено с 2,85 до 3,33 кВт/л.

С помощью программного комплекса MCU-ЖСР, разработанного НИЦ «Курчатовский институт», были проведены обосновывающие нейтронно-физические расчеты. Определены распределения потоков нейтронов и энерговыделения в элементах конструкции, определены эффективности РО СУЗ, просчитаны различные варианты ведения кампании реактора.

Проанализированы различные варианты дискретной очистки и подпитки топливом (с заменой от 7 до 10 % топливной соли один раз в год).

Подтверждена возможность ведения кампании реактора ИЖСР без очистки топлива с периодической подпиткой ядерными материалами.

Предложен алгоритм подбора шагов по выгоранию и подпиток. Показана возможность проводить подпитку с различной частотой и различными порциями (вплоть до перехода к подпитке один раз в сутки), что позволит выбрать наиболее удобный для эксплуатации режим (или режимы).

Выполнен расчет теплогидравлических характеристик контуров теплоотвода, обоснована схема теплоотвода с дополнительным газовым контуром между промежуточным (солевым) контуром РУ и водяным контуром системы отвода тепла конечному поглотителю. Введение газового контура обеспечивает надежный теплоотвод в переходных и пусковых режимах.

Для интенсификации теплообмена расход топливной соли увеличен на 40 % по сравнению с параметрами, принятыми в техническом предложении.

При расчете системы аварийного отвода тепла обоснована возможность расхолаживания топливной соли в дренажных баках с использованием естественной циркуляции.

Для новых параметров и конструкции реактора выполнены с использованием методов вычислительной гидродинамики трехмерные теплогидравлические расчеты реактора. В результате расчета обосновано, что температуры топливной соли (рис. 3) и металлоконструкций реактора (рис. 4) не превышают заданных пределов

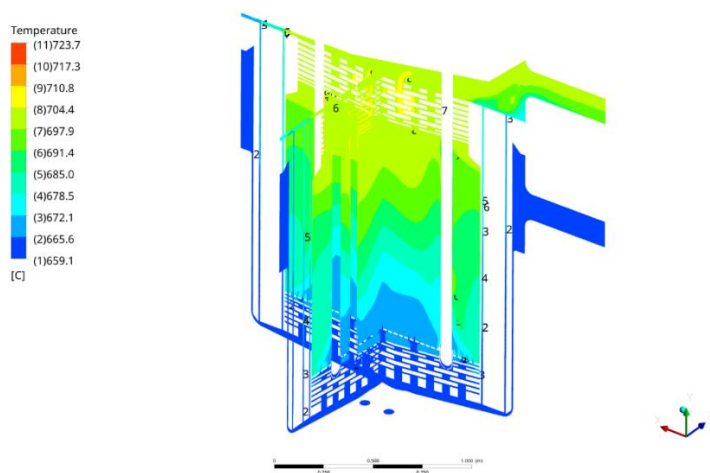


Рис. 3. Поле температуры топливной соли в различных плоскостях реактора

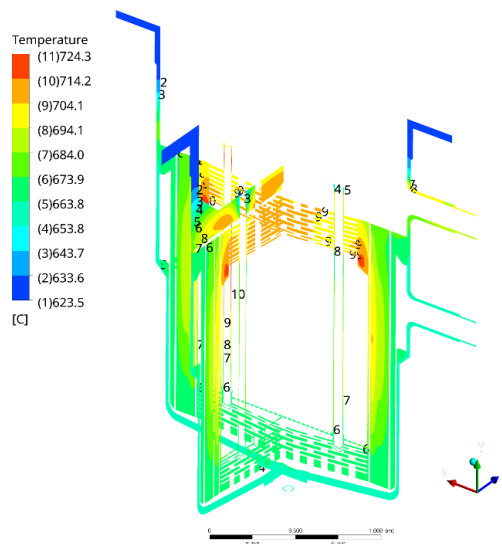


Рис. 4. Поле температуры твердотельных элементов в продольном и поперечном сечении реактора

3. Концепция безопасности

В рамках проекта ИЖСР формируется нормативная база, регламентирующая безопасность реакторов на расплавах солей. На первом этапе работы был выполнен анализ нормативной базы Российской Федерации и сформирован перечень нормативов, требующих дополнения или перевыпуска. В общем виде этот перечень включает общие положения обеспечения безопасности, правила ядерной безопасности, правила устройства оборудования и трубопроводов, правила обоснования прочности, а также целый ряд поддерживающих стандартов, на которые ссылаются перечисленные нормативы. Работа выполняется в соответствии с согласованным Ростехнадзором планом разработки нормативных документов.

В соответствии с требованиями общих положений обеспечения безопасности [2] безопасность исследовательской ядерной установки обеспечивается системой барьеров, количество которых должно быть обосновано в проекте. В концепции ИЖСР предусмотрены следующие барьеры:

- 1) топливная соль. Ядерные материалы, щелочные и редкоземельные металлы (за исключением ^{137}Cs , ^{89}Sr , ^{140}Ba), лантаниды, актиниды растворены в топливной соли. Аэрозоли, летучие галогениды, I, Xe, Kr, Ti извлекаются продувкой топливной соли и удаляются с реакторной установки;
- 2) стенки оборудования и трубопроводов;
- 3) стенки герметичных боксов;
- 4) герметичные помещения.

В концепции выделено две защитные функции безопасности: аварийный останов и аварийное расхолаживание реактора. Функция аварийного останова осуществляется стержневой системой СУЗ, а кроме того – при развитии аварийной ситуации – за счет слива топливной соли в дренажные баки с ядерно безопасной конфигурацией.

Аварийное расхолаживание в случае неисправности солевых контуров осуществляется через дренажные баки, подключенные к системе аварийного отвода тепла, работающей в режиме естественной циркуляции.

4. Переработка жидкосолевого топлива

Концепция жидкосолевого реактора-сжигателя, работающего на соли FLiBe, предполагает очистку топливной соли от растворимых продуктов деления и лантаноидов с использованием экстракции в жидкий металл. Для отработки операций обращения с топливом жидкосолевого реактора-сжигателя разрабатывается модуль переработки

облученного ядерного топлива. Помимо отработки операций извлечения продуктов деления и лантаноидов в перечень задач модуля переработки входит удаление газообразных и летучих продуктов деления, удаление осадкообразующих элементов, регенерация и корректировка состава топливной композиции, введение новой партии трансурановых элементов или минорных актинидов для трансмутации, обращение с отходами (рис. 5). Предполагается, что отбор облученной топливной соли в модуль переработки будет осуществляться партиями по мере накопления в ней продуктов деления.



Рис. 5. Схема работы модуля переработки

Заключение

Создание исследовательского жидкосолевого реактора направлено на решение важнейшей экологической задачи – утилизации долгоживущих минорных актинидов. Разработанная концепция РУ охватывает широкий круг вопросов, включая научную программу использования, инженерно-физический облик установки, концепцию безопасности, переработку топлива и т.д.

Полученные результаты эскизного проекта позволяют продолжить намеченные Программой НИОКР и дорожной картой проекта работы и перейти к разработке технического проекта реакторной установки с исследовательским жидкосолевым реактором.

Список литературы

1. Атомная энергия, т.125, в. 5. УДК 621.039.5. Жидкосольевой реактор для замыкания топливного цикла по всем актиноидам. Игнатьев В.В., Кормилицын М.В., Кормилицына Л.А., Семченков Ю.М., Федоров Ю.С., Фейнберг О.С., Крюков О.В., Хаперская А.В.
2. НП-033-11. Общие положения обеспечения безопасности исследовательских ядерных установок.