

РЕАЛИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ЗЯТЦ НА ПРИМЕРЕ ПЛОЩАДКИ ОДЭК

Федоров М.С., Зозуля Д.В., Лачканов Е.В., Дубров И.А., Хорошко А.А.,
Жиганов А.Н. (АО «СХК», Северск, Россия)

Введение

Проектное направление «Прорыв» является значимым проектом для Российской Федерации и относится к работам, которым присвоен статус «особо важных» для Госкорпорации «Росатом». В рамках данного направления предусматривается разработка ядерных энергетических технологий нового поколения на базе замкнутого ядерного топливного цикла реакторов на быстрых нейтронах с теплоносителем из свинца и смешанным нитридным уран-плутониевым (СНУП) ядерным топливом. Замыкание ядерного топливного цикла (ЗЯТЦ) с использованием реакторов на быстрых нейтронах позволяет достичь до 100 раз более эффективное использование природных ресурсов урана по сравнению с использованием в открытом ЯТЦ.

В 2010 году ГК «Росатом» инициировал работы по созданию новой технологической платформы атомной отрасли на основе быстрых реакторов и ЗЯТЦ. Принята Федеральная целевая программа «Ядерные энерготехнологии нового поколения на период 2010 – 2015 годов и на перспективу до 2020 года».

1. Ключевые преимущества реализации проекта «Прорыв»:

- 1.1. *Исключение тяжёлых аварий АЭС (реактивностные, потери охлаждения, пожары, взрывы), требующих эвакуации населения;*
- 1.2. *Замыкание ядерного топливного цикла для полного использования энергетического потенциала уранового сырья;*
- 1.3. *Полное использование энергетического потенциала уранового сырья (независимость от сырьевой составляющей);*
- 1.4. *Последовательное приближение к радиационно-эквивалентному захоронению РАО (это означает, что на хранение будут отправлены отходы с той же радиоактивностью, что и извлечённое ранее из недр сырьё);*
- 1.5. *Приведение капитальных затрат при сооружении АЭС с быстрыми реакторами, по крайней мере, до уровня АЭС с реакторами на тепловых нейтронах;*
- 1.6. *Технологическое усиление нераспространения ядерного оружия (новые реакторы не могут использоваться для его производства);*
- 1.7. *Обеспечение конкурентоспособности ЯЭ в сравнении с другими видами генерации по стоимости энергии;*
- 1.8. *Переработка ОЯТ, включая накопленные тепловыми реакторами объёмы;*
- 1.9. *Разработка и утверждение стратегии коммерциализации;*
- 1.10. *Цифровизация НИОКР, проектной и конструкторской деятельности, единое информационное пространство.*

2. Основные особенности СНУП топлива по отношению к МОКС топливу:

- 1.1. *Высокая плотность ($14,32 \text{ г/см}^3$) обеспечивает высокую топливемкость и высокий коэффициент воспроизводства топлива, позволяет делать реакторы более компактными;*
- 1.2. *Высокая теплопроводность (Для $U_{0,8}Pu_{0,2}N$ – 18 Вт/(м·К)) обеспечивает надёжность и температурную стойкость топлива: можно эксплуатировать при*

температуре до 700 °С;

- 1.3. Совместимость с жидкометаллическим теплоносителем;*
- 1.4. Исходное сырье – уран-238, которого в природе гораздо больше, чем урана-235;*
- 1.5. Малый выход агрессивных продуктов деления (цезий, йод, селен, теллур и др.) из таблеток нитрида, чем из оксидных → меньше коррозия оболочек твэлов;*
- 1.6. Хорошая растворимость в азотной кислоте (важно при переработке после облучения);*
- 1.7. В процессе эксплуатации реактора изотопный состав топлива выравнивается, что упрощает рефабрикацию топлива.*
- 1.8. Порошки нитридного топлива чувствительны к окислению, работа с материалом только в инертной среде;*
- 1.9. Двухстадийность технологии изготовления таблеток – из оксидов необходимо синтезировать нитриды, после чего из полученного материала сделать таблетки;*
- 1.10. Жесткие требования к содержанию кислорода и углерода: их содержание определяет степень взаимодействия с оболочкой.*

3. Реализация проекта «Прорыв» на АО «СХК».

В 2012 году на площадке АО «Сибирский химический комбинат» (АО «СХК») был создан комплекс экспериментальных установок (КЭУ) – уникальная площадка для опытно-промышленного производства компонентов топлива (от таблетки до тепловыделяющей сборки (ТВС)) быстрых реакторов. За это время на КЭУ впервые в мире изготовлены полномасштабные ТВС на основе СНУП, подготовлены данные для верификации технологической модели процессов изготовления СНУП-топлива, на опытных образцах оборудования проведена отработка комплексного технологического процесса с экспериментальным масштабированием технологии изготовления СНУП-топлива, отработан алгоритм автоматической разбраковки таблеток и системы обеспечения и контроля параметров внутриблочной атмосферы, а также Протестированы конструкционные материалы печей синтеза и спекания нитридного топлива. Все изготовленные ТВС успешно проходят облучение в реакторе БН-600.

С 2014 года ведутся работы по созданию на АО «СХК» площадки опытно-демонстрационного энергокомплекса (ОДЭК) – инновационной площадки, включающей в себя модуль фабрикации и рефабрикации (МФР) СНУП топлива, энергоблок с реакторной установкой (РУ) БРЕСТ-ОД-300, а также модуль переработки отработанного ядерного топлива (МП ОЯТ) РУ БРЕСТ-ОД-300.

Ситуационный план ОДЭК представлен на рисунке 1.



Рис. 1. Ситуационный план ОДЭК

МФР позволяет работать как с исходными материалами, так и с продуктами переработки ОЯТ реактора БРЕСТ-ОД-300, а также предусматривает включение в топливо минорных актинидов для последующей их трансмутации. Целью создания МФР является обеспечение фабрикации стартовой загрузки и первых перегрузок АЗ и рефабрикации топлива для последующих перегрузок АЗ РУ БРЕСТ-ОД-300.

В качестве базовой технологии получения СНУП принята технология карботермического синтеза нитридного порошка из исходных оксидных порошков урана и плутония. Для изготовления ядерного топлива (фабрикация/рефабрикация) для РУ БРЕСТ-ОД-300 принята технология изготовления таблеточного СНУП-топлива с использованием процесса вихревого размола (ВР-процесс) с последующим гранулированием, прессованием и спеканием полученной смеси с целью получения керамических таблеток необходимого качества.

МФР состоит из четырех основных технологических линий: карботермического синтеза СНУП, изготовления таблеток СНУП, сборки ТВЭЛов и сборки ТВС. Помимо основных линий, МФР оснащен аналитической лабораторией с участком материаловедческих исследований, участком технологического сопровождения, комплексом обращения с РАО (САО, НАО) и прочими вспомогательными участками и системами.

Технологическая схема получения СНУП топлива на МФР ОДЭК представлена на рисунке 2.



Рис. 2. Технологическая схема получения СНУП топлива на МФР ОДЭК

В настоящее время на объекте проводятся пуско-наладочные работы оборудования.

После обеспечения ЯТ стартовой загрузки АЗ РУ БРЕСТ-ОД-300, дальнейшим этапом развития МФР станет реализация принятого решения по реконструкции МФР для создания универсального, частично роботизированного, производства (СНУП/МОКС), с обеспечением возможности изготовления стартовой активной зоны РУ БН-1200М и рефабрикации топлива для РУ БРЕСТ-ОД-300. В результате эксплуатации универсального производства с роботизированными комплексами будут приобретены компетенции, необходимые для следующей вехи развития – создание централизованного производства модульного типа по изготовлению стартовых загрузок РУ БР-1200 с возможностью модульного расширения мощностей фабрикации.

Ключевым элементом ОДЭК является первый в мире инновационный демонстрационный опытно-промышленный энергоблок на базе быстрого реактора БРЕСТ-ОД-300 со свинцовым теплоносителем, в полной мере реализующий принципы «естественной безопасности». В настоящее время ведутся строительно-монтажные работы энергоблока.

Создание РУ БРЕСТ-ОД-300 возрождает реакторные компетенции АО «СХК» с периода эксплуатации промышленных уран-графитовых реакторов (УГР), при этом полученный опыт эксплуатации инновационной РУ БРЕСТ-ОД-300 со свинцовым теплоносителем будет уникальным и позволит решить следующую актуальную задачу – создание БР-1200.

На МП ОДЭК предполагается поэтапно реализовать комбинированную технологию переработки СНУП ОЯТ, состоящую из головных пирохимических операций, гидрометаллургического аффинажа урана, плутония и нептуния, включая выделение и разделение америция и кюрия, а также получение смешанных порошков оксидов вышеуказанных элементов.

Впервые в мире будет реализована комбинированная технология переработки ОЯТ, то есть сочетающая в себе гидрометаллургический и пирохимический передел. На основе опыта эксплуатации МП и полученных компетенций возможно тиражирование технологий переработки отработанного смешанного нитридного топлива на промышленный модуль переработки в составе ПЭК.

Также на площадке АО «СХК» в целях подтверждения принятых технологических решений, заложенных в рабочую конструкторскую документацию (РКД) на изготовление ГЦНА для РУ БРЕСТ-ОД-300 завершено строительство стенда ПСИ ГЦНА. На данном стенде будут проводиться испытания опытного образца ГЦНА в рамках реализации ПНИЭР на ОДЭК. Дополнительно стендовая база будет доработана для проведения испытаний штатных ГЦНА РУ БРЕСТ-ОД-300. К 2030 году на площадке АО «СХК» будет создана стендовая база ГЦНА и ПГ для БР-1200 на основе полученных референций в период эксплуатации стенда ГЦНА БРЕСТ.

Как уже было упомянуто ранее одной из основных целей НИОКР на ОДЭК является получение экспериментальных данных и их дальнейшая экстраполяция на установки и технологии промышленного класса в период эксплуатации объектов ОДЭК. В рамках реализации поставленной цели был заключен государственный контракт на выполнение НИОКР «Прикладные научные исследования и экспериментальное обоснование технологий реакторов на быстрых нейтронах и замкнутого ядерного топливного цикла применительно к ОДЭК. Этап 2022 и 2023 годов».

Основные направления НИР и ОКР, выполняемые в рамках данного контракта:

- усовершенствование оборудования ОДЭК;
- выполнение вероятностных оценок надежности и взрывопожаробезопасности объектов ОДЭК;
- проведение испытаний ГЦНА;
- НИОКР по роботизации технологии фабрикация ЯТ и переработки ОЯТ;
- набор статистических и эксплуатационных данных оборудования;
- верификация технологических моделей процессов изготовления топливных композиций и переработки ОЯТ;
- подтверждение конструкторских и технологических решений.

Заключение

Результаты НИОКР, достигнутые на сегодняшний день, по технологиям, применяемым на ОДЭК, позволяют перейти к коммерческой реализации и строительству промышленного энергокомплекса (ПЭК) в составе с РУ мощностью 1200 МВт.

Создаваемые в АО «СХК» компетенции в области ЗЯТЦ (топливообеспечения, эксплуатация РБН, переработка ОЯТ) делают перспективным развитие площадки АО «СХК» в части размещения ПЭК, включая ПЯТЦ на основе ранее созданных и тиражируемых объектов. Стратегические планы развития АЭ определяют такую потребность в период после 2030 г. (2036–2040 гг.).