

РЕЗУЛЬТАТЫ НИОКР ПО СОЗДАНИЮ ТЕХНОЛОГИИ И ИЗГОТОВЛЕНИЮ НА ФГУП «ГХК» ТАБЛЕТИРОВАННОГО РЕМИКС-ТОПЛИВА ДЛЯ РУ ВВЭР-1000¹

© 2023 г. Г. А. Апальков^{а,*}, О. Г. Баранов^а, А. А. Карпенко^а,
А. В. Лысиков^б, А. Н. Самохвалов^б, Ю. С. Ярополов^б

^а Горно-химический комбинат, 662978, Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, д. 53

^б Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов
им. акад. А.А. Бочвара, 123098, Москва, ул. Рогова, д. 5а

*e-mail: glaapalkov@rosatom.ru

Поступила в редакцию 28.12.2022, после доработки 28.12.2022, принята к публикации 17.01.2023

Представлен обзор основных результатов НИОКР 2020–2021 гг. по созданию технологии и изготовлению на ГХК таблетированного РЕМИКС-топлива для реакторных установок ВВЭР-1000. Описаны разработанная аппаратурно-технологическая схема процесса изготовления таблеток, результаты внедрения технологии смешивания и гранулирования порошков с использованием шаровой вибромельницы и подбора режимов работы установки. Обобщены физико-химические характеристики изготовленных таблеток РЕМИКС-топлива.

Ключевые слова: уран-плутониевое топливо, РЕМИКС-топливо, ОЯТ, рецикл, ВВЭР, шаровая вибромельница, таблетки, физико-химические параметры.

DOI: 10.31857/S0033831123030012, **EDN:** ENEYBI

ВВЕДЕНИЕ

Одним из перспективных видов рециклируемого топлива для реакторов ВВЭР является РЕМИКС-топливо (REgenerated MIXture of U, Pu oxides: (1.2–1.5)% Pu + (4.2–4.4)% ²³⁵U + U_{рег}), содержащее смесь выделенных при переработке отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) плутония и регенерированного урана [1, 2]. Рециклирование урана и плутония как решение проблемы накопления ОЯТ позволит в полной мере использовать энергетический потенциал содержащихся в ОЯТ делящихся материалов в рамках создания в РФ двухкомпонентной ядерной энергетической системы с реакторами на быстрых (РБН) и тепловых нейтронах (РТН) в замкнутом ядерном топливном цикле (ЗЯТЦ), что отражено в

основных положениях актуализированных в 2022 г. Концепции обращения с ОЯТ Госкорпорации «Росатом» на 2023–2035 гг. и перспективу до 2050 г. и Стратегии развития ядерной энергетики РФ до 2050 г. и перспективы на период до 2100 г. [3, 4].

В рамках отраслевых программ «Реферирование РЕМИКС-топлива для организации его продвижения на зарубежные рынки» и «Сбалансированный ЯТЦ» в 2020 г. была сформирована кооперация для производства первой в РФ опытной партии из шести ТВС (дизайна ТВС-2М) с РЕМИКС-топливом [5]. В сформированной кооперации изготовленная на ГХК партия таблеток РЕМИКС-топлива передана в сентябре 2021 г. на Сибирский химический комбинат (СХК) для дальнейшего снаряжения твэлов и сборки ТВС. В ноябре 2021 года опытная партия из шести ТВС-2М с РЕМИКС-топливом поставлена для опытно-промышленной эксплуатации на энергоблоке № 1 с реактором ВВЭР-1000 Бала-

¹По материалам доклада на X Российской конференции с международным участием «Радиохимия-2022» (Санкт-Петербург, 26–30 сентября 2022 г.)

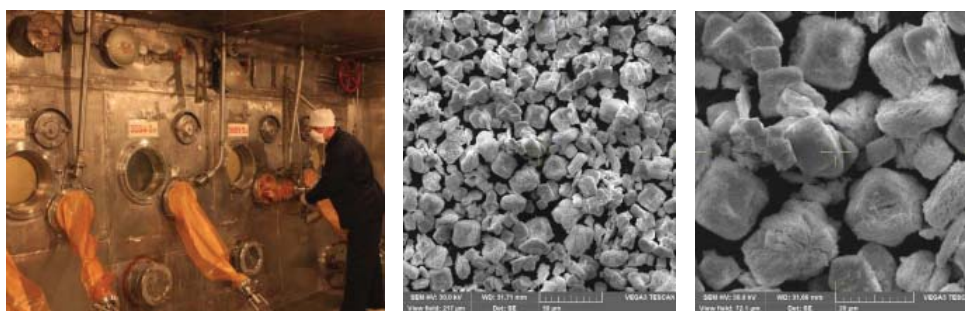


Рис. 1. Узел прокаливания солей плутония и микрофотографии частиц ДП.

ковской АЭС. В декабре 2021 года ТВС загружены в активную зону реактора в ходе плановой перегрузки топлива.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Целью выполненных в 2020–2021 гг. на ГХК научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР) являлось разработка технологии и изготовление опытной партии таблеток РЕМИКС-топлива для экспериментального обоснования уран-плутониевого топлива при опытно-промышленной эксплуатации на блоке № 1 Балаковской АЭС.

Основные задачи НИОКР заключались в подготовке производства для изготовления опытной партии таблеток РЕМИКС-топлива, разработке технологии и изготовлении опытной партии таблеток РЕМИКС-топлива для снаряжения твэлов с оболочкой из циркониевого сплава головной партии ТВС-2М, транспортировании опытной партии таблеток РЕМИКС-топлива на СХК.

В марте 2021 г. ВНИИНМ была разработана рабочая конструкторская документация (РКД, с присвоением литеры «И») на таблетки РЕМИКС-топлива в составе чертежа 310.062.001, технических условий 323.001.160 ТУ, паспорта на партию таблеток 323.001.160 ПС и передана на ГХК для изготовления партии таблеток для шести ТВС-2М с РЕМИКС-топливом. Установленные в РКД параметры идентичны ключевым нормативным требованиям для таблеток штатного оксидного уранового топлива для РУ ВВЭР-1000 [6].

Подготовительный этап работ 2020–2021 гг. включал внесение необходимых изменений в условия действия лицензии ГХК на использование

ядерных материалов при выполнении НИОКР, связанных с использованием обогащенного регенерированного урана в производстве таблеток РЕМИКС-топлива (в отличие от используемого в МОКС-производстве «отвального» урана разделительных производств), разработку соответствующих заключений по ядерной и радиационной безопасности, а также оформление материалов для обоснования возможности хранения и перевозки таблеток РЕМИКС-топлива в ТУК-30 с площадки ГХК на СХК.

Процесс фабрикации опытной партии таблеток РЕМИКС-топлива был реализован в период с апреля по сентябрь 2021 г. на базе созданного в 2014 г. на площадке ГХК промышленного производства уран-плутониевого МОКС-топлива для энергоблока № 4 с реактором БН-800 Белоярской АЭС. Технологические операции комплекса автоматизированы и размещаются в цепочке локализующих радиационно-защитных камер и боксов. Производство обеспечивает возможность автоматизированного изготовления ТВС с содержанием в топливе до 30% высокофонового энергетического плутония.

На участке переработки плутония (УПП) выполнялась очистка от америция-241 исходного диоксида плутония (ДП) от переработки ОЯТ энергетических реакторов со склада ПО «Маяк», получены партии ДП (рис. 1), однородные по изотопному составу и обладающие требуемыми керамическими свойствами. В качестве критериев «керамичности» свойств, исходя из опыта производства МОКС-топлива, рассматривались показатели «полная удельная поверхность», «насыпная плотность с утряской» и «размер частиц» порошка ДП. На рис. 1 также представлены микрофотографии ДП, полученные при помощи сканирующего электронного микроскопа Vega



Рис. 2. Роторный пресс и комплекс спекания таблеток.

3LMU с системой энергодисперсионного анализа X-MAX 50 (с увеличением 1000, 3000).

На базе комплекса изготовления таблеток выполнялись технологические операции по дозированию исходных порошков диоксида урана (ДУ, марки РАЗ по 52000-34 ТУ, АО «МСЗ») и плутония, смешиванию и грануляции порошков, приготовлению пресс-порошка, прессованию таблеток на роторном прессе, спеканию таблеток в печах садового типа (рис. 2).

На участке обращения с порошками (рис. 3) выполнялись укрупнение и подготовка «усредненных» партий ДП как после аффинажа, соответствующих требованиям технических условий 2Б.11993 ТУ (ГХК), так и без предварительной очистки от америция на УПП путем прямого сухого смешивания нескольких партий складского ДП с ПО «Маяк» с получением ДП, соответствующего требованиям технических условий 2Б.12865 ТУ (ГХК). Также на участке выполнялись операции сухого шлифования спеченных таблеток с итоговым выходным контролем таблеток, упаковкой таблеток в контейнер и перемещением на склад.

Важным требованием, предъявляемым к уран-плутониевым топливным композициям, яв-

ляется равномерность распределения урана и плутония. Требования по гомогенности или равномерности распределения плутония в топливной композиции обусловлены соображениями безопасной эксплуатации топлива в реакторе. Высокая степень гомогенности распределения плутония в топливе положительно влияет на большинство факторов, связанных с эксплуатацией топлива в реакторе. Чем выше степень гомогенности топлива, тем меньше локальных областей повышенного энерговыделения, ниже температурные напряжения топлива, более равномерная и однородная по времени и объему интенсивность выхода продуктов деления, благодаря чему достигается высокое выгорание топлива и безаварийная работа тепловыделяющих элементов. Поскольку максимальное удельное энерговыделение ограничено предельными характеристиками материалов, то снижение неравномерности энерговыделения дает возможность повысить среднюю тепловую нагрузку на делящийся материал и, следовательно, увеличить мощность активной зоны, глубину и равномерность выгорания топлива, что приводит к улучшению экономических показателей реакторной установки. Однородность энерговыделения обеспечивает равномерность теплового потока и, следовательно, снижение напряжений в обо-



Рис. 3. Участок обращения с порошками МОКС/РЕМИКС-топлива.

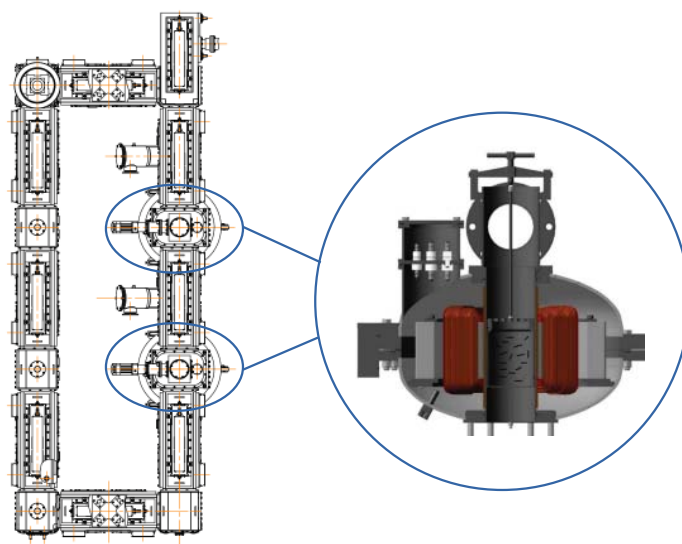


Рис. 4. Схема установки вихревого размола порошков [9] и смесителя ABC-150.

лочке твэла, что положительно сказывается на работоспособности и безопасности конструкции твэла.

Среди известных способов обеспечения равномерности распределения плутония, таких как механическое смешение исходных порошков урана и плутония, химическое соосаждение урана и плутония, получение уран-плутониевых порошков прямой денитрацией растворов нитратов урана и плутония, базовым промышленным вариантом изготовления уран-плутониевого топлива в ближнесрочной перспективе безальтернативно является способ механического смешения раздельно полученных диоксидов урана и плутония. При использовании способа механического смешения важной частью процесса является тонкий разمول (микро-низация) смеси (ди)оксидов урана и плутония, что важно для получения однородной смеси и уплотнения порошка до необходимой степени и качества. Смешение порошков производят в высокоэнергетическом оборудовании с образованием гомогенной структуры изготавливаемых топливных таблеток для обеспечения их соответствия требованиям РКД в части физико-химических свойств и параметров микроструктуры.

Опробованная в производстве таблеток МОКС-топлива для РУ БН-800 на ГХК технология вихревого размола смеси порошков оксидов урана и плутония на стадии подготовки пресс-порошка включала операции загрузки навесок порошков исходных компонентов и инициирующих разمول

ферромагнитных игл в контейнер из немагнитного материала, герметизации контейнера, перемещения контейнера с порошками и ферромагнитными иглами в полость трубы из немагнитного материала, помещенной внутрь катушки индуктора, измельчения и смешивания порошков под воздействием ферромагнитных игл, движущихся в магнитном поле индуктора, извлечения контейнера из трубы, охлаждения контейнера, разгерметизации контейнера и выгрузки полученной порошковой смеси из контейнера в аппарат гранулирования [8]. В составе промышленных установок вихревого размола на ГХК (рис. 4) в качестве механического смесителя диоксидов урана и плутония применялся аппарат вихревого слоя ABC-150 [9, 10].

Установленными в ходе производства МОКС-топлива особенностями применения способа вихревого размола и устройств для его реализации являются следующие:

1. Увеличение производственного цикла получения уран-плутониевого топлива в связи с необходимостью проведения обязательных циклов охлаждения контейнеров с порошками после смешения в вихревых смесителях типа ABC вследствие высокого разогрева смеси порошков (и контейнера) в ходе обработки магнитными иглами.

2. Сложность механических частей узлов установок (систем транспортирования, позиционирования и разгрузки контейнеров), что в отдельных случаях приводит к отказам оборудования и, как следствие,

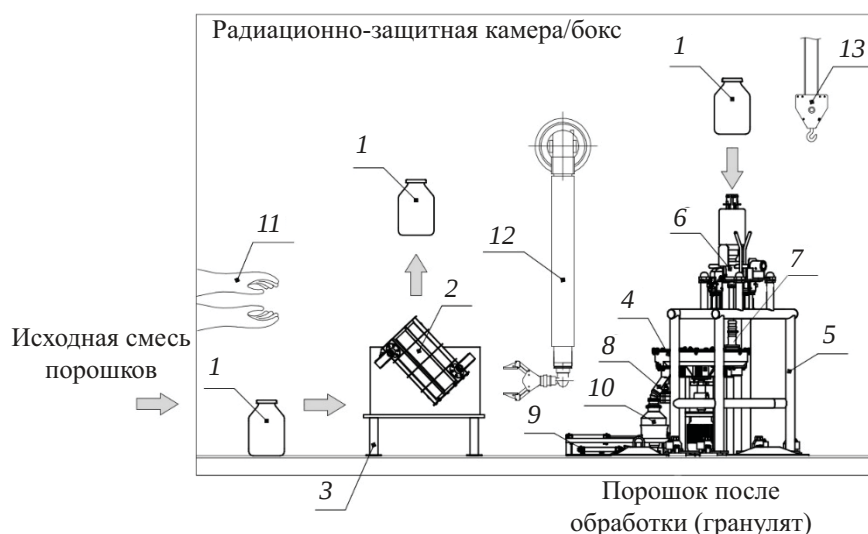


Рис. 5. Схема выполнения операций предварительного усреднения и обработки порошков в шаровой вибромельнице. 1 – контейнер ядерно-безопасного исполнения со смесью порошков оксидов урана и плутония; 2 – механический смеситель типа «пьяная бочка» или турбулентный смеситель типа TURBULA; 3 – станина (для механического смесителя типа «пьяная бочка» или турбулентного смесителя типа TURBULA); 4 – шаровая вибромельница ядерно-безопасного исполнения; 5 – станина шаровой вибромельницы; 6 – устройство загрузки порошков оксидов урана и плутония в шаровую вибромельницу, оснащенное вибропобудителем; 7 – клапан загрузки; 8 – клапан выгрузки; 9 – устройство подстыковки контейнера для выгрузки порошка (гранулята) из вибромельницы; 10 – транспортный контейнер ядерно-безопасного исполнения для приема выгружаемого порошка (гранулята) из вибромельницы; 11 – перчатки (для обслуживания узлов, размещенных в радиационно-защитном боксе); 12 – копирующий манипулятор (для обслуживания узлов, размещенных в радиационно-защитной камере); 13 – внутрикамерный кран (для обслуживания узлов, размещенных в радиационно-защитной камере).

необходимости выполнения ряда операций «вручную» (включая ремонтные работы) с увеличением дозовых нагрузок на персонал.

3. Наличие доли мелких фракций, получаемых смешением порошков в смесителях типа АВС, что оказывает влияние на получение топливных таблеток с требуемыми характеристиками (плотность, «натирания» железа в ходе обработки и др.).

Определяющим фактором необходимости применения для изготовления таблеток РЕМИКС-топлива альтернативных механических смесителей явилась невозможность стабильного обеспечения параметра микроструктуры таблеток «средний эффективный диаметр зерна» в установленном РКД диапазоне 10–25 мкм [7]. С использованием смесителя АВС-150 была изготовлена одна партия таблеток РЕМИКС-топлива, полностью соответствующая требованиям РКД.

На основе имеющегося опыта применения шаровых и молотковых мельниц в технологии производства таблеток керамического оксидного ядерного топлива [11, 12] на ГХК в ходе отработки технологии изготовления таблеток РЕМИКС-топлива

был разработан и адаптирован к условиям фабрики уран-плутониевого топлива способ одновременного измельчения, смешивания и грануляции порошков диоксидов урана и плутония в шаровой вибромельнице [13]. Порошки после обработки обладали достаточной текучестью, что позволило исключить стадии предварительного прессования брикетов (или «шашек») и их последующего размолла в качестве отдельных операций гранулирования (применяемых, например, в случае использования смесителей типа АВС).

Исходные порошки диоксида плутония, как правило, неоднородны по физическо-химическим свойствам (остаточному влагосодержанию, размерам частиц, плотности, содержанию углерода и других примесей). С целью исключения рисков снижения выхода в годный продукт готовых таблеток РЕМИКС-топлива (несоответствий по геометрическим размерам, плотности, структурной и фазовой однородности, величине зерна, содержанию углерода и других лимитируемых примесей) перед обработкой смесей (навесок) диоксидов урана и плутония в шаровой вибромельнице, прово-



Рис. 6. Общий вид шаровой вибромельницы MB-0.01, размещенной в радиационно-защитной камере.

дили предварительное механическое усреднение порошков по изотопному, химическому и гранулометрическому составу в механическом смесителе «пьяная бочка», в частности, турбулентных смесителей типа TURBULA.

На рис. 5 представлена схема выполнения операций предварительного усреднения порошков оксидов урана и плутония с последующей их обработкой (измельчении, смешении и грануляции) в шаровой вибромельнице, реализованная в ходе изготовления таблеток РЕМИКС-топлива [13].

Автоматизация узлов шаровой вибромельницы с возможностью их дистанционного обслуживания позволяет минимизировать выполнение «ручных» операций в ходе фабрикации уран-плутониевого топлива. Операции включения шаровой вибромельницы в работу, управления клапанами загрузки и выгрузки, запуска цикла обработки порошков в шаровой вибромельнице с установлением времени обработки порошков осуществляют прямой дистанционной подачей управляющего воздействия с панели автоматизированного рабочего места, входящей в состав локальной системы управления. Элементы крепления и герметизации частей установки позволяют дистанционно производить их (де)монтаж с заменой отдельных частей без полного извлечения установки из радиационно-защитной камеры (бокса) при работе с порошками уран-плутониевого топлива.

На рис. 6 представлен общий вид шаровой вибромельницы MB-0.01 с размещением в радиационно-защитной камере.

Для достижения целевых характеристик таблеток РЕМИКС-топлива выполняли подбор технологического режима работы оборудования: времени предварительного смешивания (усреднения) навесок порошков ДУ и ДП, времени обработки порошков ДУ и ДП в шаровой вибромельнице, массы загрузки рабочей камеры мелющими телами (шарами), размера и материала мелющих тел (шаров), массы обрабатываемой смеси, скорости вращения вала вибровозбудителя, параметров вертикальных и горизонтальных вибрационных характеристик (вибросмещения, виброускорения) [7, 13].

При обработке в шаровой вибромельнице равномерное распределение компонентов смеси, движущихся в рабочей камере по спиралеобразной траектории, обеспечивается за счет более интенсивного измельчения и перемешивания вследствие большего количества соударений мелющих тел при их колебаниях, в частном случае, подбором горизонтальных и вертикальных виброускорений. Относительное повышение производительности и снижение энергозатрат достигается за счет сокращения времени обработки, а также исключения необходимости дополнительной операции – грануляции смеси порошков, что, кроме того, повышает степень автоматизации производства. При работе шаровой вибрационной мельницы воздействие мелющих тел на порошок производится не только за счет истирания конгломератов порошка (подбора горизонтальных параметров вибрации), но и за счет взаимных соударений шаров и внутренних элементов камеры (подбора вертикальных параметров вибрации), вследствие чего производится уплотнение (грануляция) порошка, повышается текучесть и формуемость пресс-порошка. Более высокая чистота обрабатываемого материала достигается за счет пониженного износа мелющих тел и стенок смесителя и подбора материала мелющих тел. При достаточно высоких вибрационных воздействиях на обрабатываемый материал достигаются пониженный износ мелющих тел и стенок смесителя за счет подбора материала мелющих тел и смесителя.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате выполнения НИОКР на ГХК разработана технология изготовления таблеток таблетированного РЕМИКС-топлива для РУ ВВЭР-1000.

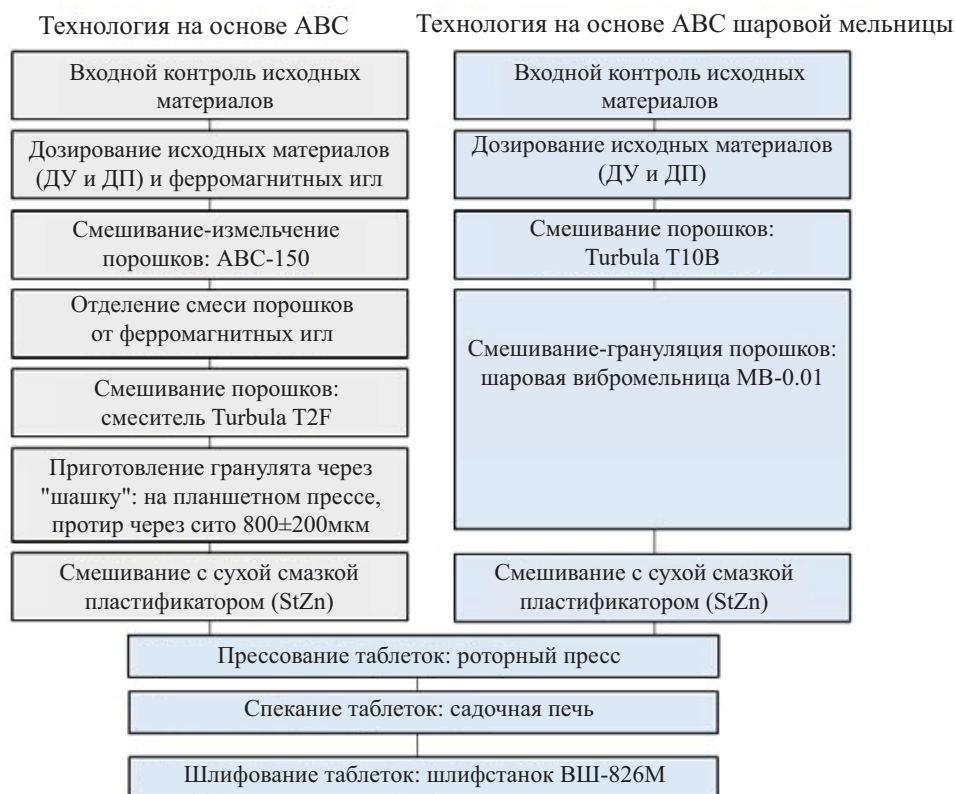


Рис. 7. Аппаратурно-технологическая блок-схема изготовления таблеток РЕМИКС-топлива на ГХК.

Проведена квалификация специальных процессов смешивания порошков в шаровой вибромельнице MB-0.01 и вихревом смесителе АВС-150, а также спекания таблеток РЕМИКС-топлива в печах садочного типа (рис. 7) [6].

Фабрикация таблетированного уран-плутониевого РЕМИКС-топлива выполнялась следующим образом [13]. Готовили навеску смеси диоксидов урана и плутония. Навеску предварительно усредняли в смесителе TURBULA T10B/T2F. Операции измельчения, смешивания, гранулирования смеси порошков ДУ и ДП после усреднения проводили путем обработки в шаровой вибромельнице MB-0.01 при следующих технологических параметрах:

скорость вращения шаровой группы – 1750 об/мин;
время работы шаровой вибромельницы – до 60 мин;
время выгрузки – 5 мин;

масса загруженных шаров (Ø20мм, сталь 95Х18) – 38 кг;

радиальное виброускорение – не менее 4.5g, вертикальное – не менее 11.5g.

После окончания обработки полученный гранулят выгружали из вибромельницы в контейнер, смешивали с сухой смазкой и далее передавали на операцию прессования таблеток. Насыпная плотность порошка составляла 2.0–3.2 г/см³, высота спрессованных таблеток – 10.63–10.78 мм, плотность «сырых» таблеток – 6.10–6.11 г/см³.

Полученные топливные таблетки помещали в печь и проводили спекание при выдержке в течение 4 ч при температуре 1750°C в восстановительной среде (аргоно-водородная смесь). После остывания печи выгружали полученные таблетки.

Далее спеченные таблетки направляли на операцию шлифования. Для шлифования использовали автомат специальный круглошлифовальный бесцентровой ВШ-826М. Диаметр топливных таблеток после шлифования составлял 7.587–7.590 мм.

Применение в процессе изготовления уран-плутониевого РЕМИКС-топлива шаровой вибромельницы (с операцией предварительного механического усреднения) позволило:

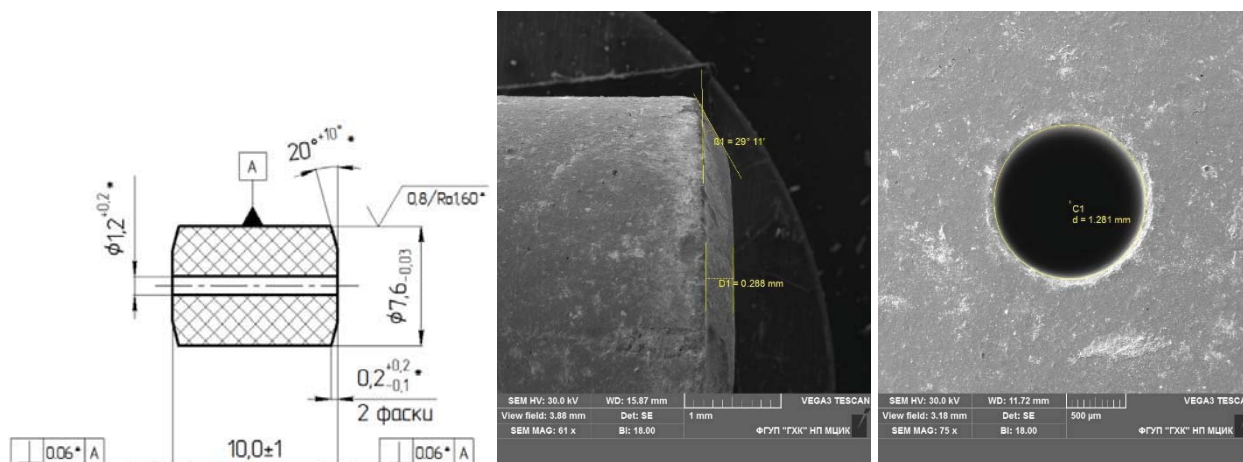


Рис. 8. Чертеж 310.062.001 [6] и микрофотографии таблеток РЕМИКС-топлива.

совместить операции измельчения, смешивания и гранулирования исходных порошков ДУ и ДП с реализацией переделов в одном технологическом оборудовании, что упростило аппаратурно-технологическую схему изготовления таблеток;

стабилизировать химический состав изготавливаемых уран-плутониевых таблеток по однородности примесей за счет снижения намола материалов мелющих тел и стенок смесителя при обработке порошка, а также физических параметров (плотности, микроструктуры, «доспекаемости» во всем объеме партии изготавливаемых таблеток);

обеспечить равномерное распределение плутония в смеси порошков после обработки и далее в изготавливаемых спеченных таблетках;

повысить производительность и снизить энергопотребление в течение всего технологического цикла изготовления уран-плутониевых таблеток.

Для обеспечения соответствия параметров таблеток РЕМИКС-топлива требованиям технических условий 323.001.160 ТУ и чертежа 310.062.001 в ходе НИОКР выполняли подбор и определение оптимальных характеристик процесса обработки смеси порошков в вибрационной шаровой мельнице: объема рабочей зоны, массы шаров, допустимого объема загрузки, массы обрабатываемой смеси порошков, времени обработки, скорости вала вибропобудителя, времени выгрузки.

На рис. 8 представлен чертеж таблетки РЕМИКС-топлива 310.062.001 [6] с микрофотогра-

фиями изготовленных на ГХК таблеток (данные измерения геометрии таблеток со сканирующего электронного микроскопа Vega 3LMU с системой энергодисперсионного анализа X-MAX 50).

В результате подбора режимов обработки порошков ДУ и ДП в шаровой вибромельнице продемонстрирована возможность стабильного поддержания выхода в годный продукт таблеток уран-плутониевого топлива свыше 80%.

Для решения вопроса утилизации бракованных таблеток уран-плутониевого топлива опробован и впоследствии внедрен в производство готовой продукции способ «подшихтовки» на операции подготовки пресс-порошка в исходную смесь диоксидов урана и плутония порошка, полученного в результате окисления несоответствующих требованиям РКД (бракованных) спеченных таблеток РЕМИКС-топлива, в количестве до 20 мас% [14]. Процесс предварительного окисления не соответствующих требованиям РКД спеченных уран-плутониевых таблеток проводили при температуре $350 \pm 50^\circ\text{C}$ в течение 6–8 ч в муфельной печи, размещенной в радиационно-защитном перчаточном боксе. Изготовленная вышеуказанным образом партия таблеток соответствовала требованиям РКД, выдержала типовые и приемочные испытания в полном объеме и была отгружена в составе готовой продукции на СХК для снаряжения твэлов.

Предложенный подход в сравнении с используемым для переработки некондиционных таблеток уран-плутониевого МОКС-топлива (скрапа) путем

их радиохимической переработки на УПП ГХК с выделением и очисткой плутония для последующего возврата в форме диоксида в производство [15] позволил сократить объем образующихся радиоактивных отходов, увеличить сквозной выход продукции в годный продукт, а также в целом улучшить технико-экономические показатели производства уран-плутониевого топлива.

Контроль качества таблеток РЕМИКС-топлива на ГХК был реализован на базе системы аналитического контроля МОКС-топлива для РУ БН-800, включающей применение 18 аттестованных аналитических методик выполнения измерений (МВИ) физико-химических параметров порошков и таблеток.

С учетом требований РКД на РЕМИКС-таблетки был доаттестован ряд МВИ для контроля параметров «массовая доля плутония», «массовая доля изотопов урана», «условная массовая доля изотопов плутония», «максимальный линейный размер участков с повышенным содержанием плутония от номинального значения», «массовая доля фосфора». Также были разработаны и аттестованы новые МВИ для контроля параметров «кислородный коэффициент», «массовая доля водорода», «объемная доля открытых пор», «измерение изменения среднего наружного диаметра таблеток в результате термообработки в % по отношению к исходному диаметру (доспекаемость)», «шероховатость таблеток», «максимальный размер отдельной поры в срезе шлифа», «количественная доля пор, наблюдаемых в плоскости шлифа», «средний эффективный диаметр зерна».

В сентябре 2021 г. на ГХК завершено изготовление партий таблеток РЕМИКС-топлива для шести ТВС-2М в количестве более 3300 кг (107% от планируемого количества с учетом резерва при возникновении брака на операциях снаряжения твэлов). Изготовленные таблетки (рис. 9) в соответствии программой и методикой приемочных испытаний 310.062.001 ПМ выдержали испытания с подтверждением соответствия характеристик таблеток требованиям РКД.

Физико-химические характеристики таблеток, изготовленных с использованием шаровой вибромельницы МВ-0.01 по всему массиву принятых партий, представлены



Рис. 9. Лодочка с таблетками РЕМИКС-топлива. АО «СХК» для снаряжения твэлов и сборки ТВС было отгружено 258 партий таблеток РЕМИКС-топлива, 257 из которых изготовлены с использованием шаровой вибромельницы МВ-0.01, 1 партия – с использованием смесителя АВС-150.

в табл. 1 в виде предельных диапазонов варьирования анализируемых параметров.

Выполненный в работе [7] анализ полигонов рассеяния средних значений контролируемых параметров таблеток РЕМИКС-топлива по выборкам из партий показал, что после выпуска первых партий таблеток РЕМИКС-топлива процесс стабилизировался, и при выпуске основного массива продукции средние значения качественных параметров находились вблизи центров полей допусков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ключевые результаты выполненного на ФГУП «ГХК» НИОКР.

Изготовлена партия таблеток РЕМИКС-топлива в необходимом для изготовления шести ТВС-2М количестве.

Вновь разработаны и (до)аттестованы более 10 методик выполнения измерений (к применяемым для контроля МОКС-топлива РУ БН-800) заданных параметров таблеток РЕМИКС-топлива для РУ ВВЭР-1000.

Квалифицирована и внедрена в производство технология изготовления оксидного уран-плутониевого топлива с применением шаровой вибромельницы [7, 13].

Применение опробованной в рамках НИОКР (РЕМИКС) технологии смешивания и гранулирования порошков с использованием шаровой вибро-

Таблица 1. Физико-химические характеристики таблеток РЕМИКС-топлива [6, 7]

№ п/п	Наименование показателя	Значение
1	Массовая доля суммы изотопов урана и плутония, %	88.1–88.2
2	Массовая доля плутония в смеси изотопов урана и плутония	Соответствует
3	Условная массовая доля изотопа урана-235 в сумме изотопов урана	техпроекту на твэл
4	Кислородный коэффициент	2.000–2.005
5	Условная массовая доля примесей, %:	
5.1	бор	0.00001
5.2	железо	0.02
5.3	кремний	0.003–0.004
5.4	марганец	0.0001–0.0007
5.5	медь	0.0001–0.0020
5.6	никель	0.0002–0.0070
5.7	хром	0.0009–0.0070
5.8	азот	0.0007–0.0070
5.9	углерод	0.003
5.10	фтор	0.0011
5.11	хлор	0.0011
5.12	алюминий	0.0002–0.0090
5.13	кальций	0.001
5.14	магний	0.0003–0.0020
5.15	вольфрам	0.0010–0.0011
5.16	ванадий	0.0010–0.0011
5.17	кадмий	0.00003
5.18	молибден	0.0003–0.0030
5.19	фосфор	0.003–0.006
5.20	цинк	0.0010–0.0012
6	Массовая доля общего водорода, %	<0.00001–0.00003
7	Суммарный борный эквивалент, %	0.00003–0.00007
8	Плотность, г/см ³	10.35–10.70
9	Объемная доля открытых пор, %	0.02–0.92
10	Доспекаемость, %	0.01–0.31
11	Средний эффективный диаметр зерна, мкм	12–23
12	Количественная доля пор с эффективным диаметром 1–10 мкм, %	99.0–100.0
13	Максимальный линейный размер участка с повышенным содержанием плутония, мкм	< 40
14	Максимальное содержание плутония на плоскости шлифа, %	7–15
15	Расчетная масса топливного столба длиной 1000 мм, г	454–464

мельницы впоследствии в производстве МОКС-топлива для РУ БН-800 на ГХК позволило:

исключить ручные операции на этапе смешивания и гранулирования порошков диоксидов урана и плутония;

исключить операцию гранулирования как отдельный передел, совместив операции смешивания и гранулирования в шаровой вибромельнице;

обеспечить резерв по производительности операций смешивания и гранулирования относительно проектных решений за счет размещения и готовности к работе второй шаровой вибромельницы в защитной камере.

Предложен способ утилизации бракованных таблеток уран-плутониевого топлива для сокращения объемов не соответствующей требованиям РКД продукции и радиоактивных отходов, направлен-

ный на увеличение выхода готовой продукции в годный продукт и, как следствие, улучшение технико-экономических показателей производства уран-плутониевого топлива [7, 14]. В настоящее время на ГХК завершены исследовательские работы в обоснование внедрения указанного подхода в технологию изготовления таблеток МОКС-топлива для РУ БН-800.

Подтверждена возможность массового изготовления уран-плутониевого топлива с заданными характеристиками топлива для реакторов ВВЭР-1000/1200. Полученные результаты свидетельствуют о возможности изготовления качественных топливных таблеток, соответствующих по своим характеристикам установленным современным требованиям РКД (чертежа и технических условий), с обеспечением экономической приемлемости процесса фабрикации уран-плутониевого топлива для АЭС на тепловых нейтронах с ректорами типа ВВЭР.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Похитонов Ю.А. // Радиохимия. 2017. Т. 42, № 6. С. 481–487.
2. Гаврилов П.М., Крюков О.В., Иванов К.В., Хаперская А.В., Павловичев А.М., Семченков Ю.М., Федоров Ю.С., Зильберман Б.Я., Дудукин В.А., Апальков Г.А. Патент 2702234 РФ. 2019.
3. Приказ Госкорпорации «Росатом» от 05.12.2022 №1/1618-П-дсп «Об утверждении Концепции обращения с отработавшим ядерным топливом Госкорпорации «Росатом» на 2023–2035 годы и перспективу до 2050 года и перечня целевых показателей и индикаторов мероприятий по обращению с отработавшим ядерным топливом».
4. Стратегия развития ядерной энергетики России до 2050 г. и перспективы на период до 2100 г. Утверждена протоколом заседания Стратегического совета Госкорпорации «Росатом» от 11.04.2022 №1-СС/14-Пр-дсп.
5. Решение от 01.04.2021 №320.06.ТП-580-БАЛ-1 об организации работ по изготовлению и опытно-промышленной эксплуатации шести ТВС-2М с РЕМИКС-топливом на блоке № 1 Балаковской АЭС, начиная с 27 топливной кампании.
6. Михеев Е.Н., Новиков В.В., Кузнецов В.И., Лысиков А.В., Самохвалов А.Н., Ярополов Ю.Л., Глушенков А.Е., Колупаев Д.Н., Апальков Г.А., Баранов О.Г., Карпенко А.А., Гаврилов В.А. Анализ результатов промышленного производства и характеристик уран-плутониевого РЕМИКС-топлива для реакторов ВВЭР. Матер. научно-технической конф. «Материалы ядерной техники» (МАЯТ-2021). М., 2021. <https://bochvar.ru/vopros/mayat>.
7. Лысиков А.В., Михеев Е.Н., Самохвалов А.Н., Ярополов Ю.Л., Глушенков А.Е., Константинов О.П. // Вопр. атом. науки и техники. Сер.: Материаловедение и новые материалы. 2022. Вып. 4(115). С. 97.
8. Астафьев В.А., Глушенков А.Е., Скупов М.В., Столяров М.И., Шкабура И.А. Патент 2262756 РФ. 2005.
9. Кравченко В.А., Глазунов В.А., Гамза Ю.В., Бычков С.И., Бараков Б.Н., Ильиных Ю.С., Русанов С.В., Белозеров С.Г., Рыбалкин И.А., Сосунов Р.Ю. Патент 2670979 РФ. 2018.
10. Гамза Ю.В., Русанов С.В., Бараков Б.Н., Ильиных Ю.С., Рыбалкин И.А. Патент 2702621 РФ. 2019.
11. Иванов А.В., Дерр В. Освоение на ОАО «МСЗ» производства уран-гадолиниевого топлива по спецификациям «Framatome ANP» // МСЗ 2003: Ядерное топливо для АЭС. Электросталь, 2003. № 2. С. 22.
12. Решетников Ф.Г., Бибилашвили Ю.К., Головин И.С., Горский В.В., Казеннов Ю.И., Меньшикова Т.С., Никулина А.В., Романеев В.В. Разработка, производство и эксплуатация тепловыделяющих элементов энергетических реакторов. М.: Энергоатомиздат, 1995. Кн. 1. С. 110.
13. Баранов О.Г., Карпенко А.А., Апальков Г.А., Ильиных Ю.С., Никитин С.С., Бычков С.И. Патент 2772886 РФ. 2022.
14. Колупаев Д.Н., Баранов О.Г., Карпенко А.А., Рассамгин С.В., Падалкин П.А., Апальков Г.А., Никитин С.С. Патент 2785819 РФ. 2022.
15. Производство МОКС-топлива на ФЯО ФГУП «ГХК»: Сб. докл. отраслевой конф. по теме «Замыкание топливного цикла ядерной энергетики на базе реакторов на быстрых нейтронах». Томск, 2018. С. 259–261.