

ЯДЕРНАЯ
И АЛЬТЕРНАТИВНАЯ
ЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.039.1

**Г. А. Кравченко, С. В. Рассамагин,
С. В. Русанов, И. Ю. Косарев**

*ФГУП «Горно-химический комбинат»,
г. Железнодорожск, Красноярский край, Россия*

ПОЛУЧЕНИЕ МОКС-ТОПЛИВА КАК ОДИН ИЗ ЭТАПОВ ЗАМЫКАНИЯ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА

Описывается ядерно-топливный цикл (ЯТЦ) на современном этапе развития и предлагается путь его развития в направлении МОКС-топлива. Описана схема получения таблеточного уран-плутониевого топлива на опытном стенде ГХК.

Ключевые слова: ядерно-топливный цикл, МОКС-топливо, опытный стенд.

**G. A. Kravchenko, S. V. Rassamagin,
S. V. Rusanov, I. Yu. Kosarev**

*FSUE «Mining and Chemical Combine»,
Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, Russia*

MOX-FUEL RECEPTION, AS ONE OF STAGES OF SHORT CIRCUIT OF THE NUCLEAR FUEL CYCLE

The nuclear-fuel cycle (JFC) at the development present stage is described, and the way of its development to direction MOX of fuel is offered. The reception scheme tablet fuel uranium-plutonium at skilled stand MCC is described.

Keywords: nuclear-fuel cycle, MOX-FUEL, the skilled stand.

В настоящее время в связи с исчерпанием запасов U^{235} (как рудных, так и складских) все большее внимание привлекает Pu^{239} как основа будущего реакторного топлива, поскольку 1 грамм плутония эквивалентен 100 граммам извлеченного из ОЯТ урана, 1500–3000 кубометрам природного газа, 2–4 тоннам угля или 1 тонне нефти. В настоящее время в мире работают 430 ядерных реакторов, из которых ежегодно выгружают около 10 000 тонн отработанного ядерного топлива (ОЯТ), содержащего 70 тонн плутония. Согласно приблизительным оценкам 92 тонны оружейного плутония достаточно для замены 11 040 тонн природного урана. 252 тонны энергетического плутония позволяют заменить 30 240 тонн природного

урана. В то же время плутоний является опасным радиоактивным материалом, который может быть использован и для создания ядерных зарядов. Поэтому его накопление не только расточительно, но и опасно. Общее количество плутония, хранящегося в мире на начало XXI в. во всевозможных формах, оценивается в 1239 тонн, из которых значительная часть находится в отработанном ядерном топливе АЭС. Уже сейчас более 120 тысяч тонн ОЯТ находится в хранилищах, а к 2020 г. его будет 450 тысяч тонн. Проблема обращения с плутонием является частью общего процесса ядерного разоружения, в ходе которого в России и США высвобождаются значительные количества оружейных делящихся материалов – высокообогащенного урана и плутония.

Все стадии функционирования ядерного топливно-энергетического комплекса, такие

как производство топлива для ядерных реакторов, подготовка его к использованию, сжигание топлива в реакторе, утилизация отработанного топлива, промежуточное хранение, вместе взятые составляют так называемый ядерный топливный цикл (ЯТЦ).

Ядерный топливный цикл подразделяется на два вида: открытый (разомкнутый), нацеленный на захоронение отработанного топлива и радиоактивных отходов, и закрытый (замкнутый), предусматривающий переработку отработанного топлива и других отходов предприятий ядерной индустрии с целью выделения ценных элементов.

Этапы замкнутого ЯТЦ включают поддержку отработанного ядерного топлива на территории АЭС в течение 3–10 лет; временное контролируемое хранение ОЯТ в автономных хранилищах при радиохимическом заводе (сроком до 40 лет), переработку ОЯТ с выделением из него отдельных (или суммы) делящихся нуклидов и продуктов деления, представляющих коммерческий интерес, отверждение и захоронение отходов.

Переработка ОЯТ даёт некоторые экономические выгоды, восстанавливая неиспользованный уран и вовлекая в энергетику наработанный плутоний. При этом уменьшается объем высокорadioактивных и опасных отходов, которые необходимо надлежащим образом хранить. В ОЯТ содержится примерно 1 % Pu. Это очень хорошее ядерное топливо, которое не нуждается ни в каком процессе обогащения, оно может быть смешано с обедненным ураном и поставляться в виде свежих топливных сборок для загрузки в реакторы. Его можно использовать для загрузки и в реакторы на быстрых нейтронах [1].

В разомкнутом (открытом) ЯТЦ отработанное ядерное топливо считается высокоактивным радиоактивным отходом и вместе с остаточными делящимися изотопами исключается из дальнейшего использования – поступает на хранение или захоронение. Разомкнутый ЯТЦ характеризуется низкой эффективностью использования природного урана (до 1 %).

К преимуществам замкнутого ЯТЦ относят возврат в энергетику дорогостоящих делящихся материалов – U и Pu, что обеспечит атомную энергетику топливом. Кроме того, объёмы высокорadioактивных отходов, предназначенных для вечного захоронения, гораздо меньше после переработки ОЯТ, чем объ-

ёмы отработавших тепловыделяющих сборок (ОТВС) без их переработки.

Очевидно, что любой ядерный топливный цикл – дорогостоящее и опасное производство. Выбор оптимального варианта ЯТЦ – серьезная проблема для страны и мира в целом.

Из 34 стран в настоящее время лишь Индия, Япония, Англия, Россия, Франция перерабатывают отработанное ядерное топливо на своих предприятиях. Большинство стран, включая Канаду, Финляндию, Германию, Италию, Нидерланды, Швецию, Швейцарию, Испанию, США и КНР, либо хранят ОЯТ, либо передают ОЯТ на переработку другим странам.

Реакторы типа ВВЭР, РБМК и БН сегодня составляют основу российской атомной энергетики и, вероятно, будут играть ту же роль в первой половине XXI в. В настоящее время они используют оксидное топливо.

В связи с этим представляется весьма логичным, что в планах инновационного развития Госкорпорации «Росатом», изложенных в федеральной целевой программе «Ядерные энерготехнологии нового поколения на период 2010–2015 годов и на перспективу до 2020 года», проекты по разработке плотного топлива сочетаются с промышленным освоением и внедрением смешанного оксидного (МОКС) топлива.

Для производства МОКС-топлива разработано множество методов: механическое смешивание и совместный размол порошков PuO_2 и UO_2 ; золь-гель – технология; гранулирование осадков гидроксидов; аммоний-карбонатное соосаждение; плазмохимическая конверсия; пироэлектрохимический процесс получения гранулированного смешанного диоксида (твёрдого раствора) с последующей виброупаковкой в оболочке ТВЭЛов и др. В случае применения механического смешивания оксидов на качество спеченной МОКС-таблетки (плотность, пористость, гомогенность распределения металлов, однородность образовавшихся твёрдых растворов) определяющее влияние оказывают физико-химические свойства керамических компонентов – оксидов урана и плутония [2].

Наиболее приемлемой химической формой плутония при использовании его в качестве топлива для энергетических реакторов является двуокись плутония PuO_2 в смеси с двуокисью природного либо обедненного

урана UO_2 , Смешанное оксидное топливо, или МОКС ($PuO_2 + UO_2$), используется в двух типах реакторов – в реакторах на быстрых нейтронах (БН) и в легководных реакторах (ЛВР).

Концентрация плутония в МОКС-топливе для реакторов на БН существенно выше – в их топливе содержание плутония в топливе составляет 20 %. Таблетки МОКС можно изготавливать путем механического смешивания исходных порошков диоксидов урана и плутония с образованием «основной смеси» UO_2-PuO_2 . Использование смешивающего аппарата позволяет сократить время смешивания с 16–24 ч до нескольких минут при одновременном измельчении и уплотнении частиц порошка. Содержание плутония в смеси затем корректируется для использования в реакторе путем добавления UO_2 . Эта технология обеспечивает получение однородной структуры таблеток с повышенной плотностью.

Исторически в СССР, а ныне в Российской Федерации разрабатывались и обосновывались две технологии формирования топливного стержня ТВЭЛа ядерного реактора: таблеточная технология и технология виброуплотнения. Каждая из них имеет свои преимущества и недостатки.

Таблеточная технология МОКС-топлива представляет собой проекцию давно и успешно освоенной технологии урановой «таблетки» на изготовление смешанного оксидного уран-плутониевого топлива. Преимуществом данной технологии является то, что «таблетки» как продукт отдельного передела хорошо поддаются контролю. Кроме того, уже получен значительный положительный опыт фабрикации и облучения экспериментальных тепловыделяющих сборок (ТВС) с таблеточным топливом в активной зоне реактора БН-600. К числу недостатков можно отнести чувствительность технологии к примесям и целевым добавкам, например, при реализации замкнутого цикла с трансмутацией минорных актинов.

Реализации процесса получения таблеточного МОКС-топлива, используемого в энергетических ядерных реакторах в промышленных масштабах, должен предшествовать процесс разработки технологии его производства.

Несмотря на то, что процесс производства таблеточного смешанного оксидного уран-плутониевого топлива давно освоен и изучены основные закономерности операций

технологического процесса, новое производство с учетом всех особенностей и конкретных требований предприятий, выпускающих топливо, и предприятий, потребляющих это топливо, требует освоения и проверки на опытном промышленном участке. В России и в мире нет опыта получения таблеточного МОКС-топлива в печах садового типа с загрузкой 15–20 кг, и как следствие отсутствуют данные по керамическим свойствам полученного продукта.

Для решения этой задачи, а также с целью пуска производства таблеточного МОКС-топлива в декабре 2014 г. (в соответствии с ФЦП «ЯЭТНП») и обеспечения требуемой производительности для топливообеспечения реакторной установки БН-800 (Белоярская АЭС) выбрана площадка ФГУП «ГХК» для размещения опытного стенда в выработках Радиохимического завода.

При выполнении исследований решаются следующие задачи.

1. Проведение исследований в промышленной садовой печи с проверкой рекомендованных ОАО «ВНИИНМ» режимов спекания с загрузкой (до 20 кг по МОКС), обеспечивающей проектную производительность производства, включающее:
 - определение влияния расхода восстановительной газовой смеси на качество получаемых таблеток МОКС-топлива;
 - оптимизация температурных режимов спекания;
 - определение максимально возможной загрузки печи.
2. Отработка методик измерений ЦЗЛ, необходимых для тестирования качества топливных порошков и изготовленных таблеток.
3. Анализ результатов исследований с выдачей рекомендаций по режимам спекания (подготовка технологического регламента подготовки «мастер-смеси» и условий спекания).

На стенде будет размещаться 11 защитных перчаточных боксов для выполнения технологических операций по приему исходных продуктов, их смешиванию, прессованию, спеканию, определению плотности и геометрических размеров таблеток МОКС-топлива. Схематично расположение и назначение устанавливаемых перчаточных боксов представлено на рис. 1.

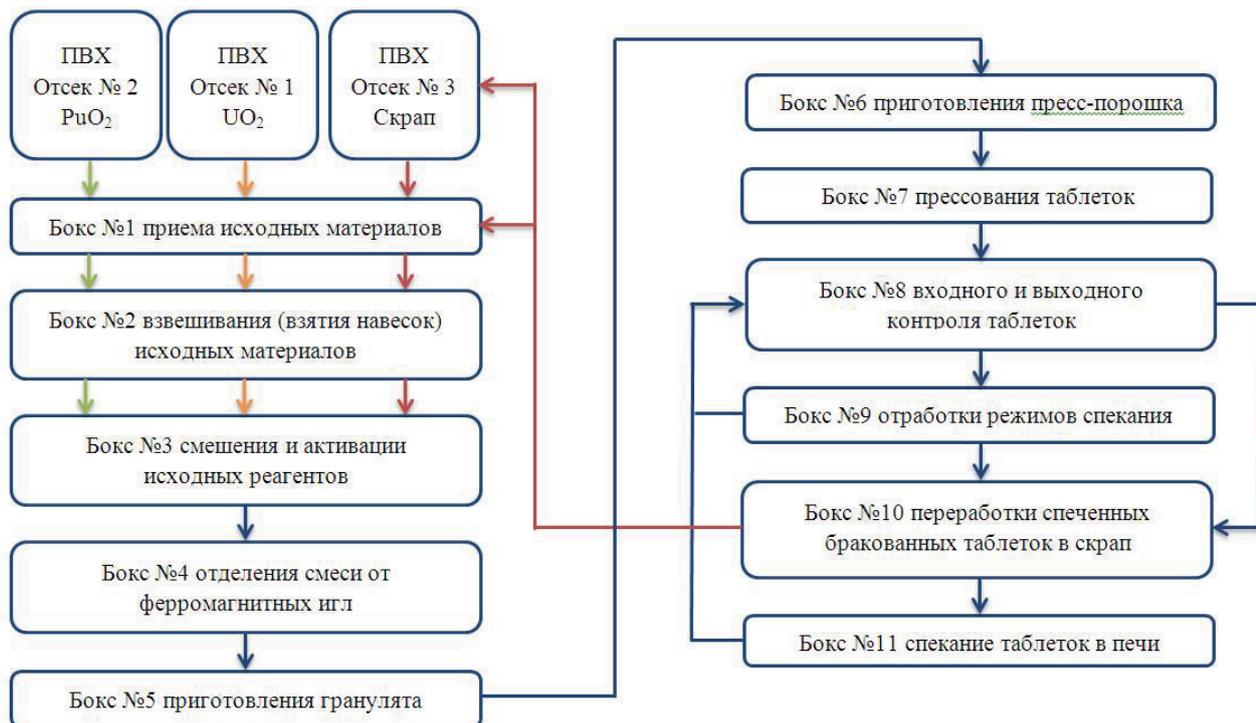


Рис. 1. Схематичное расположение и назначение боксов опытного стенда по отработке режимов спекания таблеточного МОКС-топлива

Для достижения соответствующей плотности должны быть проконтролированы три фактора.

1. Исходный порошок. Порошок UO₂ и PuO₂, обеспечивающий образование флюоритовой кубической фазы. Конечный контроль площади поверхности порошка и размеров зёрен.
2. Температура спекания. Спекание проводится в интервале температур 1650–1700 °С для обеспечения обратной диффузии катионов.
3. Атмосфера. Для контроля окислительно-восстановительных процессов в смеси используется смешанная атмосфера аргона и водорода.
4. Оборудование стенда располагается в герметичных защитных боксах, оснащенных перчатками (крагами) для проведения технологических операций и обслуживания оборудования. Плутоний – высокотоксичное соединение, поэтому к производству МОКС-топлива предъявляют повышенные требования к технике безопасности, которые значительно выше, чем в производстве топливных таблеток из UO₂. Особая токсичность и радиационные свойства плутония сильно влияют на планировку завода и выполнение рабочих операций, в связи

с этим боксы оборудованы биологической защитой, обеспечивающей радиационную безопасность персонала при работе с диоксидом плутония и диоксидом урана, которая подтверждена:

- заключением ФГУП «ГНЦ РФ-ФЭИ» по ядерной безопасности опытного стенда с печью «GERO»;
- заключением ФГБУ ВНИИПО МЧС РОССИИ по результатам анализа пожаро-взрывоопасности при проведении работ на опытном стенде ФГУП «ГХК» по спеканию таблеток МОКС-топлива в садочной печи фирмы «GERO».

Тестирование таблеток планируется выполнять в ЦЗЛ, используя для передачи проб линию пневмопочты.

Основное содержание работ:

- 1) разработать проекты рабочих инструкций по определению насыпной плотности с утряской, прессуемости порошков, спекаемости, размера зерна и структуры таблеток, гидростатической плотности спеченных таблеток и фракционного состава, а также технологической документации участка тестирования;
- 2) провести термодинамические, газодинамические и кинетические расчеты процесса спекания таблеток МОКС в садочных пе-

чах. Оценить условия моделирования процессов спекания таблеток МОКС-топлива и последующего масштабирования этих условий. Выполнить моделирование;

- 3) определить причины деградации таблеток при увеличенных загрузках в садку:
 - исследовать причины деградации таблеток при увеличенных загрузках, спровоцировав условия деградации таблеток (имитаторов и МОКС-топлива) в существующих лабораторных печах, и найти режимы, препятствующие деградации таблеток;
 - провести исследования в промышленной садочной печи на имитаторе и МОКС-топливе с учетом опыта исследований в лабораторных печах.

Выполнение исследований позволит выбрать необходимую производительность (до 20 кг), обеспечивающую получение таблеток, соответствующих ТУ на таблеточное

МОКС-топливо для РУ БН-800; отработать технологические режимы спекания таблеток МОКС-топлива в садочной печи «GERO» и обеспечить внедрение их в производство в установленные директивным графиком сроки.

Библиографические ссылки

1. Котельников Р. Б., Башлыков С. Н., Каштанов А. И., Меньшикова Т. С. Высокотемпературное ядерное топливо. М. : Атомиздат, 1978.
2. Ма Б. М. Материалы ядерных энергетических установок. М. : Энергоатомиздат, 1978.
3. Бобылев А. И. и др. Атомная энергия. 2003. Т. 95, № 4. С. 301–305.
4. Жиганов А. Н. и др. Технология диоксида урана для керамического ядерного топлива. Томск : STT, 2002. С. 61–91.

*Статья поступила в редакцию
20.11.2013 г.*