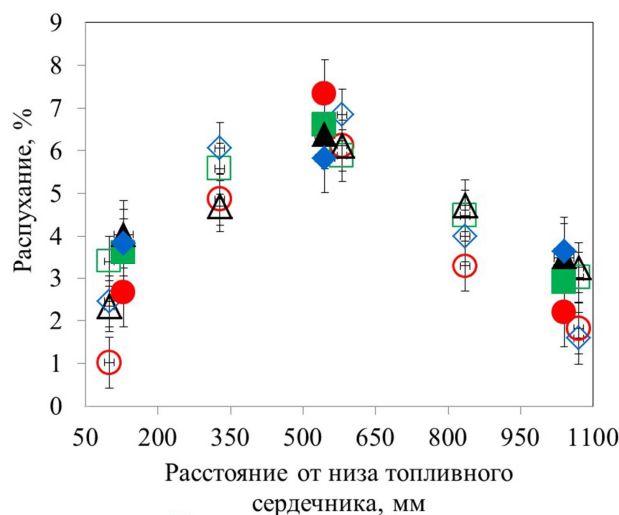




Р и с. 4. Осевое распухание нитридного топлива по высоте топливного столба в ТВЭлах 32 (○, ●), 37 (△, ▲), 42 (◇, ◆), 52 (□, ■) ЭТВС-5, определенное по планиметрии и плотности соответственно

Максимальное распухание смешанного нитридного топлива в ТВЭлах ЭТВС-5 составляет $7,3 \pm 0,8\%$, что соответствует скорости распухания $2,0 \pm 0,2\%$ на 1% тяж. ат. выгорания по измерению диаметра и плотности таблеток (рис. 4).

Следует отметить, что во всех исследованных ТВЭлах ОУ-1, КЭТВС-3, ЭТВС-5 зазор меж-

ду топливом и оболочкой не выбран, что соответствует свободному распуханию топлива. Для всех исследованных ТВЭлов максимальное распухание и максимальная скорость распухания отмечаются в сечениях, близких к сечению максимального энерговыделения.

Таким образом, послереакторные исследования семи экспериментальных ТВС БН-600 и одной ТВС БОР-60 показали, что ТВЭлы герметичны. Максимальная повреждающая доза ТВЭлов с оболочкой ЭП-823-Ш ~ 75 смещ./ат., выгорание 5% тяж. ат. достигнуто в ОУ-2 БОР-60.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Троянов В.М., Грачев А.Ф., Забудько Л.М. и др. Программа и некоторые результаты реакторных испытаний смешанного нитридного топлива в быстрых реакторах. — Атомная энергия, 2015, т. 118, вып. 2, с. 75—79.
2. Грачев А.Ф., Забудько Л.М., Глушенков А.Е. и др. Исследования смешанного нитридного уран-плутониевого топлива в рамках проекта «Прорыв». — Там же, 2017, т. 122, вып. 3, с. 156—167.
3. Рогозкин Б.Д., Степеннова Н.М., Федоров Ю.Е. и др. Результаты испытаний смешанного мононитридного топлива $45\%PuN + 55\%UN$ и $60\%PuN + 40\%UN$ в реакторе БОР-60 до выгорания $\sim 12\%$ тяж. ат. — Там же, 2011, т. 110, вып. 6, с. 332—346.

Поступила в Редакцию 20.09.18

УДК 621.039

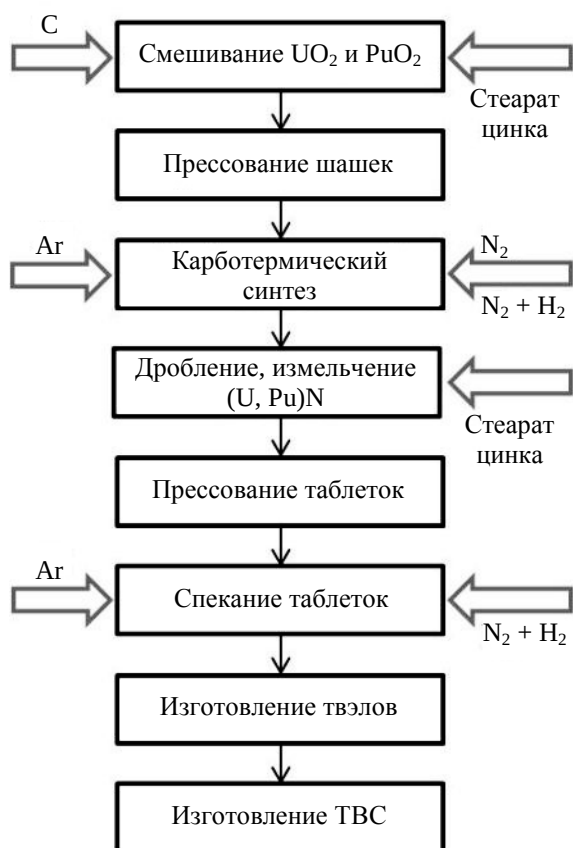
УСТАНОВКА КАРБОТЕРМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА НИТРИДОВ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА СМЕШАННОГО НИТРИДНОГО УРАН-ПЛУТОНИЕВОГО ТОПЛИВА

Смирнов В.П., Павлов С.В., Иванов Д.В., Шамсутдинов Р.Н. (ООО НПФ «Сосны», г. Димитровград),
Инютин Н.В., Сидоренко Д.М., Солопеко А.В. (ООО НПО «ГКМП», г. Брянск), Сайфутдинов С.Ю.
(АО «ТВЭЛ», г. Москва), Давыдов А.В. (АО «ВНИИНМ», г. Москва), Чамовских Ю.В., Сергеев Н.Г.
(АО «СвердНИИХиммаш», г. Екатеринбург), Зозуля Д.В. (АО «СХК», г. Северск)

Один из вариантов замыкания ядерного топливного цикла (ЯТЦ) предполагает использование смешанного нитридного уран-плутониевого топлива в быстрых реакторах. В рамках проекта «Прорыв» на площадке АО «Сибирский химический комбинат» создается Опытно-демонстрационный энергетический комплекс (ОДЭК) для отработки технологий замкнутого ЯТЦ [1]. Топливо для реакторной установки БРЕСТ-ОД-300, входящей в состав ОДЭК, будет изготавливаться на базе модуля фабрикации/рефабрикации с использованием

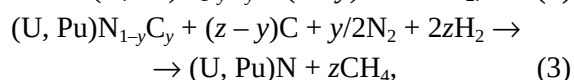
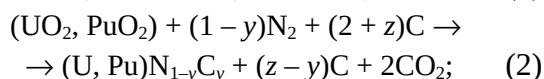
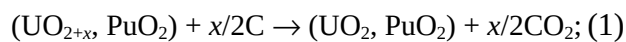
как ранее наработанного плутония, так и плутония, полученного в процессе эксплуатации (рис. 1).

Нитрид урана и плутония синтезируют по карботермической технологии восстановления металлов из оксидов с одновременным нитрированием [2—6]. На первом этапе порошки UO_2 и PuO_2 смешивают, добавляют углерод и стеарат цинка. Из полученной шихты прессуют шашки диаметром 18—20 мм, высотой 3—5 мм и массой 7—9 г. Содержание UO_2 и PuO_2 составляет 85 и 15% соответственно. Полученные шашки



Р и с. 1. Последовательность основных операций изготовления смешанного нитридного уран-плутониевого топлива

направляют в печь, где происходит синтез нитридов, который можно представить тремя основными реакциями [2]:



где x, y, z — стехиометрические коэффициенты.

Карботермический синтез осуществляется при температуре $1650 \pm 50^\circ\text{C}$ сначала в азотной атмосфере, затем в атмосфере азота и водорода [3]. При нагреве диоксид урана из застехиометрического состояния переходит в стехиометрическое (реакция 1). Далее шашки выдерживаются при той же температуре в атмосфере азота (реакция 2). В целях недопущения образова-

ния уран-плутониевого карбонитрида вместо нитрида вследствие избытка углерода в газовую среду вводят водород, который, взаимодействуя с углеродом, образует метан CH_4 (реакция 3). Таким образом, в результате синтеза образуется нитрид урана и плутония, а также газы CO_2 , CO и метан CH_4 , которые постоянно по мере их образования удаляют из зоны протекания реакции. Нитрид урана и плутония охлаждают в атмосфере аргона в целях предотвращения образования высших нитридов урана [6].

Структурная схема установки карботермического синтеза показана на рис. 2. Основными элементами установки являются шесть высокотемпературных садочных печей синтеза горизонтального типа, входной/выходной бокс, два шлюзовых бокса (входной и выходной), шесть камер охлаждения, транспортно-технологическая система перемещения лодочек с шашками, включающая каналы загрузки и выгрузки, шесть установок газоочистки, системы подачи газов, воды для охлаждения печей, а также система управления и контроля.

Для осуществления карботермического синтеза нитридов в разных элементах установки должна поддерживаться своя газовая атмосфера. Так, входной/выходной бокс и боксы газоочистки заполнены азотом, основная газовая среда шлюзовых боксов, каналов загрузки, выгрузки и камер охлаждения — аргон. В печах синтеза газовая среда меняется — Ar , N_2 и $\text{N}_2 + \text{H}_2$. Для разделения газовых сред в установке используются герметичные шиберы восьми типов, расположение которых показано на рис. 2.

Лодочки с шашками



Р и с. 2. Структурная схема установки: 1—8 — герметичные шиберы

Непрерывность технологического процесса обеспечивается циклическим режимом работы: одна печь разогревается, четыре находятся в изотермическом режиме (в них синтезируются нитриды), шестая печь остывает. Шашки внутри установки транспортируются в специальных лодочках. Их движение отображается на мнемосхемах пульта управления и контроля.

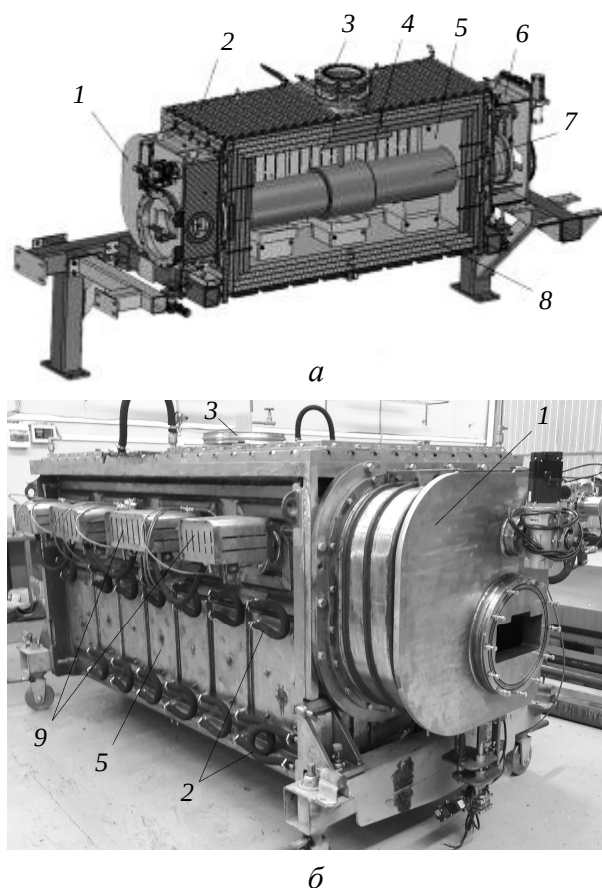
Установка работает в автоматическом режиме и дистанционно управляется одним оператором с выносного пульта, на котором отображается информация о ходе технологического процесса.

Ядерная и радиационная безопасность при эксплуатации обеспечивается, в первую очередь, конструкцией установки и ее составных частей, а также ограничением массы делящихся изотопов урана и плутония. Герметичное исполнение оборудования исключает выход радиоактивных продуктов за пределы установки. Для предотвращения аварийных ситуаций и поломки установки при отказе ее элементов и систем предусмотрены системы блокировок и оповещения об отказах.

Основным элементом установки карботермического синтеза нитридов является садочная печь горизонтального толкательного типа периодического действия (рис. 3). Корпус печи выполнен из коррозионно-стойкой стали, на наружной стороне смонтированы трубопроводы водяного охлаждения. На торцах трубопровода расположены герметичные шиберы, соединяющие печь с каналом загрузки и камерой охлаждения. Трехсекционный электронагреватель печи выполнен из композитного материала.

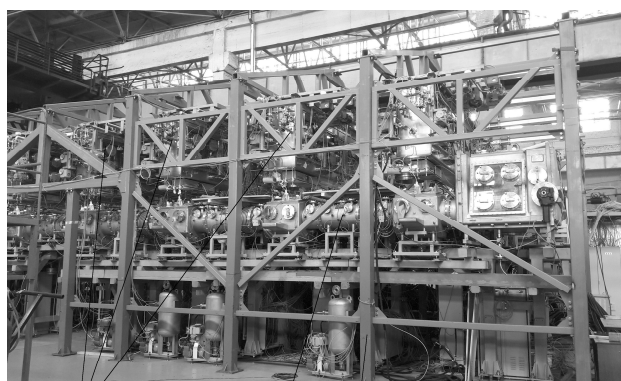
Внутри корпуса расположена цилиндрическая вольфрамовая реторта, в которой протекают реакции синтеза нитридов. Реторта герметично соединена с обоими шиберами. К реторте подведены трубопроводы для подачи технологических газов, в ее центральной части расположен трубопровод для удаления печных газов в установку газоочистки. Реторта делит внутренний объем печи на две части — заретортное и ретортное пространство. В заретортное пространство постоянно поступает аргон, в то время как внутрь реторты на разных этапах синтеза подается Ar , N_2 и смесь газов ($\text{N}_2 + \text{H}_2$).

Важным параметром печи, от которого зависит эффективность реакций карботермического синтеза, является температурное поле внутри



Р и с. 3. 3D-модель (а) и внешний вид (б) печи карботермического синтеза: 1, 6 — входной, выходной шибер соответственно; 2 — контур водяного охлаждения корпуса; 3 — трубопровод отвода печных газов; 4 — электронагреватели; 5 — корпус; 7 — реторта; 8 — футеровка; 9 — подвод электропитания нагревателей

реторты, где находятся лодочки с шашками. Оно зависит от температуры в трех секциях нагревателей, а также от температуры газа и его расхода через реторту. Для обоснования теплофизических режимов работы печи в программном обеспечении SolidWorks Flow Simulation была разработана 3D-модель, с помощью которой рассчитана температура на поверхности шашек в лодочках для изотермического режима работы в зависимости от температуры нагревателей и расхода газа через реторту [7]. Измерение температуры на поверхности загруженных имитаторов шашек для одного из режимов работы печи показало, что расхождение между расчетными и экспериментальными данными не превышает 0,7%. Это подтверждает возможность использования расчетной модели печи и программного обеспечения для моделирования режимов работы и определения оптимальной температуры нагревателей.

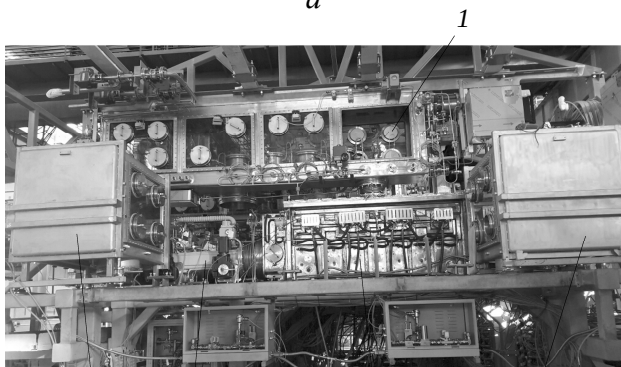


1

2

3

а



2

4

б

5

6

Р и с. 4. Общий вид установки сбоку (а) и с торца, противоположного входному/выходному боксу (б): 1 — установки газоочистки; 2 — канал выгрузки; 3 — рамная конструкция; 4 — камера охлаждения; 5 — печь; 6 — канал загрузки

Заключение. Впервые созданная промышленная установка карботермического синтеза нитридов для производства смешанного нитридного уран-плутониевого топлива в 2017 г. успешно прошла заводские испытания (рис. 4). Результаты испытаний подтвердили ее работоспособность. Печное оборудование обеспечивает реализацию реакции синтеза нитридов, установка в целом отвечает требованиям ядерной и радиационной безопасности при эксплуатации как в ручном, так и в автоматическом режиме.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адамов Е.О., Алексахин Р.Н., Большов Л.А. и др. Проект «Прорыв» — технологический фундамент для крупномасштабной ядерной энергетики. — Изв. РАН, Энергетика, 2015, № 1, с. 5—13.
2. Алексеев С.В. Нитридное топливо для ядерной энергетики. М.: Техносфера, 2013. 240 с.
3. Bauer A. Nitride Fuel. — Properties Potentials, Reactor Technology, 1972, v. 15, № 2, p. 87—104.
4. Котельников Б.Р., Башлыков С.Н., Каштанов А.И., Меньшова Т.С. Высокотемпературное ядерное топливо. Изд. 2-е. М.: Атомиздат, 1978. 432 с.
5. Poutasso G., Richter K., Sori C. Investigation of reaction $UO_{2+x} + PuO_2 + C + N_2$ by thermogravimetry. — J. Nucl. Mater., 1988, v. 158, p. 12—18.
6. Bordell P., Warin D. Mechanism and kinetics of the uranium-plutonium mononitride synthesis. — Ibid., 1992, v. 188, p. 36—42.
7. Алямовский А.А., Собачкин А.А., Одинцов Е.В. и др. SolidWorks 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике. СПб: БХВ-Петербург, 2008. 1040 с.

Поступила в Редакцию 15.08.18

УДК 621.039.736

ОТВЕРЖДЕНИЕ ПУЛЬП ОТРАБОТАННЫХ ИОНООБМЕННЫХ СМОЛ С ПОМОЩЬЮ ПОЛИМЕРНЫХ СВЯЗУЮЩИХ

Кащеев В.А., Мусатов Н.Д., Тучкова А.И., Смелова Т.В. (АО «ВНИИНМ», г. Москва),
Валов Д.А., Зинин А.В. (АО «НИКИМТ-Атомстрой», г. Москва)

При эксплуатации АЭС образуется значительное количество радиоактивных отходов, представляющих собой пульпы сорбентов (перлит, активированный уголь) и отработанные ионообменные смолы. Их переработка является одной из наиболее сложных и дорогостоящих по сравнению с другими видами переработки радиоактивных отходов. Накопленные объемы (десятки тысяч кубических метров), а также темпы образования (до нескольких десятков кубических метров на реактор в год) и специфические свойства данного типа отходов требуют применения особых методов обращения.

Анализ преимуществ и недостатков применяемой в настоящее время переработки гетерогенных радиоактивных отходов показывает, что выбрать оптимальную технологию сложно.

Наиболее распространенным методом кондиционирования ионообменных смол зарубежных АЭС является их включение в полимерные матрицы [1]. Привлекательность использования для этих целей полимерных связующих обу-