

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ КАНАЛА ПЕЧИ СПЕКАНИЯ ТАБЛЕТОК ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

И.В. Кузьмин*, **А.Ю. Лещенко***, **С.В. Павлов*,****, **Р.Н. Шамсутдинов*,****,
Ю.С. Мочалов***

* ООО НПФ «Сосны»

433507, Ульяновская обл., г. Димитровград, пр. Димитрова, 4а

** ДИТИ НИЯУ МИФИ

433511, Ульяновская обл., г. Димитровград, ул. Куйбышева, 294

*** ЧУ «ИТЦП «Прорыв»»

107140, г. Москва, ул. Малая Красносельская, 2/8, к. 4

Р

Спекание таблеток ядерного топлива в высокотемпературных печах осуществляется в атмосфере со строго определенными требованиями по составу газовых сред в различных температурных зонах печи. Реализация заданного технологического режима в печи спекания таблеток смешанного нитридного уран-плутониевого (СНУП) топлива обеспечивается схемой подачи газов, конструкцией барьеров между температурными зонами, а также узлов подачи и отвода газов. Для проверки работоспособности заложенных технических решений при разработке канала печи спекания СНУП-топлива была создана расчетная CFD-модель в пакете Ansys Fluent и выполнена ее валидация. Чтобы выполнить валидацию расчетной модели, был разработан и изготовлен макет канала печи спекания, который входит в состав экспериментального стенда для газодинамических исследований.

Приведены описание конструкции и технические характеристики экспериментального стенда для измерения концентрации газов в канале, имитирующем канал печи спекания нитридного ядерного топлива. Результаты газодинамических исследований на экспериментальном стенде были использованы для расчетно-экспериментального обоснования технических решений, примененных при разработке конструкции канала печи спекания. Экспериментально проверена работоспособность барьеров для разделения канала печи спекания на зоны с заданным составом газовых сред, узлов подачи и отвода газов. Полученные экспериментальные данные по распределению концентрации технологических газов позволяют проводить валидацию расчетных теплофизических и газодинамических CFD-моделей канала печи спекания СНУП-топлива.

Ключевые слова: газодинамические исследования, печь спекания, канал печи, зона печи, СНУП-топливо, моделирование распределения газов, измерение концентрации газа, отбор проб газа, барьер.

ВВЕДЕНИЕ

Перспективным ядерным топливом для реакторов на быстрых нейтронах является так называемое «плотное топливо», превосходящее по плотности наиболее распространенный в настоящее время диоксида урана UO_2 . Для реакторов БН-1200 и БРЕСТ-ОД-300 предусматривается использование смешанного нитридного уран-плутониевого (СНУП) топлива $UPuN$ [1 – 3].

На площадке АО «Сибирский химический комбинат» в рамках проекта «Прорыв» создается опытно-демонстрационный энергетический комплекс (ОДЭК), в состав которого входит модуль фабрикации (рефабрикации) (МФР) уран-плутониевого нитридного топлива [4]. Одной из основных операций фабрикации топливных таблеток для твэлов является их спекание [5]. Спекание производится для улучшения физико-механических свойств таблеток – повышения плотности и механической прочности. Обычно спекание топливных таблеток в промышленных масштабах осуществляется в высокотемпературных горизонтальных печах толкательного типа, в которых таблетки последовательно перемещаются по каналу печи через три зоны – нагрева, спекания и охлаждения [6].

Технология и оборудование для спекания диоксида урана хорошо отработаны и успешно используются на протяжении десятков лет, однако опыт спекания таблеток СНУП-топлива в промышленных масштабах в настоящее время отсутствует [7, 8]. Несмотря на серьезный накопленный опыт по производству СНУП-топлива в лабораторных условиях [9 – 12] существуют следующие сложности для реализации промышленной технологии спекания данного топлива:

- необходимость обеспечения заданного состава газовых сред в различных температурных диапазонах цикла спекания для предотвращения образования $(U, Pu)_2N_3$, не пригодного для промышленного использования;

- отсутствие герметичного оборудования технологической цепочки фабрикации СНУП-топлива с инертной средой. Порошки нитридов урана и плутония пирофорны и самовоспламеняются в воздушной среде. Все процессы фабрикации, предшествующие заключительной стадии спекания таблеток $UPuN$, должны быть выполнены в инертной среде с содержанием кислорода и воды не более 50 ppm.

Спекание таблеток $UPuN$ происходит при более высокой температуре (~ 1950°C), чем таблеток UO_2 (~ 1870°C). Таблетки $UPuN$ спекают в восстановительной атмосфере смеси газов аргона, азота и водорода. При этом к составу газов предъявляются жесткие требования: нагрев и охлаждение СНУП-топлива должны проводиться в атмосфере аргона с содержанием азота не более 0,1 об.%, а спекание – в азотно-аргоно-водородной атмосфере с содержанием азота не менее 50 об.% [4, 13].

Таким образом, при разработке толкательной печи для спекания таблеток $UPuN$ необходимо решить две принципиальные задачи: во-первых, обеспечить требуемое температурное поле в объеме канала печи, во-вторых, разделить его внутренний объем на три зоны с разной газовой атмосферой без использования каких-либо задвижек или шиберов, перекрывающих сечение канала печи. Эксплуатация печи с радиоактивными веществами и отсутствие возможности визуального контроля закрытого объема канала печи спекания не позволяют использовать имеющиеся технические решения в других отраслях промышленности [6, 14]. В связи с этим предложены новые технические решения, обеспечивающие заданный состав газовой среды в температурных зонах канала печи спекания таблеток СНУП-топлива.

Для разработки и обоснования конструкции печи спекания таблеток СНУП-топлива и режимов её эксплуатации в CFD-пакете Ansys Fluent была разработана газодинамическая модель канала печи [15, 16]. Для валидации расчетной модели был разработан и изготовлен макет канала печи, который входит в состав эксперимен-

тального стенда для газодинамических исследований. Макет воспроизводит внутренние размеры канала печи спекания в масштабе 1:1. Подобные методы расчетно-экспериментальных исследований распределения концентрации компонентов газовых смесей в установках, где необходимо учитывать перемешивание газов, являются распространенной практикой [17 – 20].

В статье описан стенд для газодинамических исследований процессов течения и перемешивания газов в макете канала печи спекания. С его помощью выполнена расчетно-экспериментальная проверка предложенных технических решений по обеспечению заданного состава газовой среды в объеме канала печи спекания таблеток СНУП-топлива.

ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ ЗАДАННОГО СОСТАВА ГАЗОВОЙ СРЕДЫ В КАНАЛЕ ПЕЧИ СПЕКАНИЯ ТАБЛЕТОК СНУП-ТОПЛИВА

Канал печи спекания таблеток СНУП-топлива (рис. 1) образован внутренней поверхностью футеровки (теплоизоляции), выполненной в виде кирпичной кладки из керамических материалов. Таблетки ядерного топлива располагаются в лодочках прямоугольной формы, которые установлены на подложки. Подложки используются для исключения контакта лодочек друг с другом, что уменьшает вероятность их деформации, и для передачи усилия со стороны толкательного механизма по всей цепочке подложек.

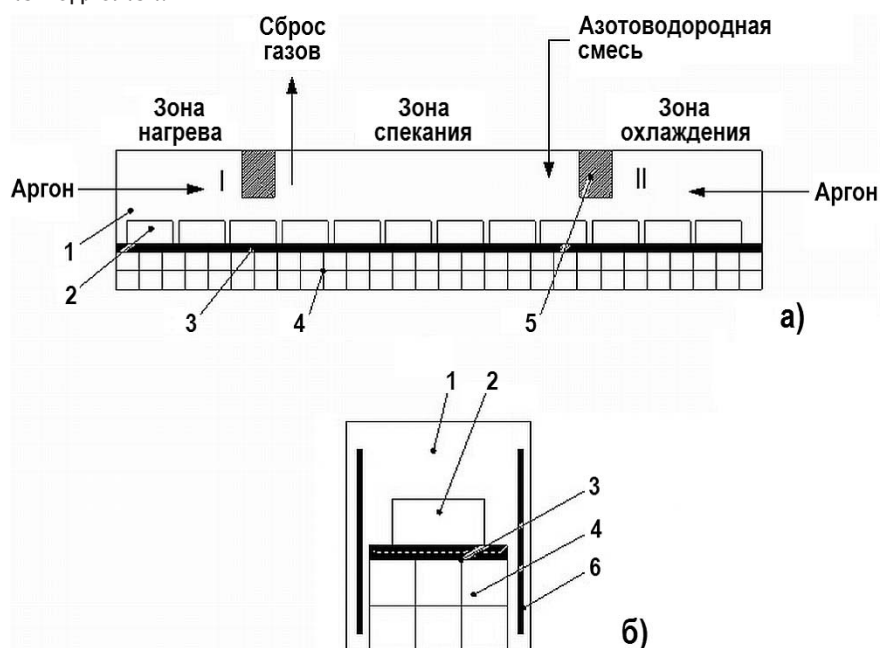


Рис. 1. Принципиальная схема канала печи спекания со схемой подачи газов: продольный (а) и поперечный (б) разрезы: 1 – канал; 2 – лодочка с таблетками; 3 – подложки; 4 – скользящая кладка; 5 – барьер; 6 – нагреватель

Температурное поле внутри канала печи формируется многосекционными независимыми электронагревателями, расположенными вертикально около боковых стенок канала. Канал печи делится на зоны нагрева, спекания и охлаждения, в которых должны поддерживаться определенная температура и атмосфера с заданным составом.

При разработке печи спекания было принято несколько технических решений для разделения газовых сред в рабочем канале:

- аргон подается со стороны зон предварительного нагрева (вход лодочек в канал) и охлаждения (выход лодочек из канала);
- канал печи оборудован двумя барьерами, которые отделяют зону предварительного нагрева от зоны спекания (барьер I, рис. 1а) и зону спекания от зоны охлаждения (барьер II, рис. 1а), перекрывающими верхнюю и боковые части поперечного сечения канала таким образом, чтобы в нижней части канала оставалось достаточно места для движения лодочек;
- азотоводородная смесь подается в зону спекания со стороны барьера II навстречу движению лодочек с топливными таблетками;
- отвод газов из канала печи производится в зоне спекания около барьера I.

Эффективность разделения газовых сред внутри канала печи определяется конструкцией барьеров, узлов подачи и отвода газов, а также технологическими параметрами (распределение температуры по объему канала, расход аргона и азотоводородной смеси, давление газов внутри канала печи).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для проверки предложенных технических решений создан экспериментальный стенд для газодинамических исследований, в состав которого входят макет канала печи спекания и система подачи, отвода и измерения концентрации газов (рис. 2). Макет повторяет внутренние размеры канала печи спекания СНУП-топлива с учетом находящихся внутри подложек с лодочками, в которых размещены топливные таблетки.

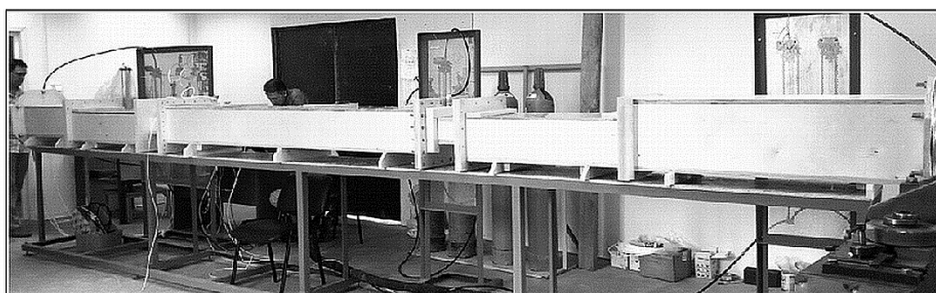


Рис. 2. Общий вид (а) и обозначение зон (б) макета канала печи спекания

Цепочка лодочек, загруженных таблетками, на подложках моделируется монолитным прямоугольным параллелепипедом по всей длине макета канала печи. Между скользящей кладкой и боковыми стенками макета канала расположены макеты нагревателей, предназначенные для детального воспроизведения формы канала печи и не используемые для нагрева макета канала, т.е. все измерения проводятся при комнатной температуре.

При экспериментах на стенде вместо азотоводородной смеси использовали кислород, который технически намного проще регистрировать в аргоне. Поскольку теплофизические параметры кислорода близки к параметрам азота, газодинамические процессы в макете канала печи принципиально протекают одинаково и замена газов не влияет на качество валидации газодинамической модели канала печи спекания.

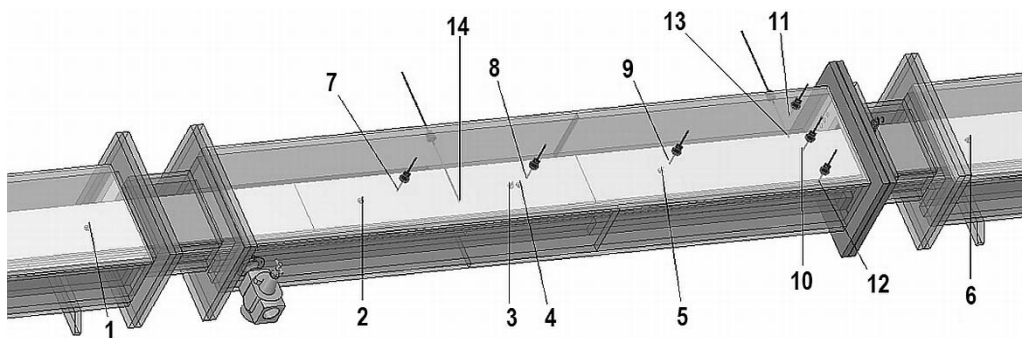


Рис. 3. Расположение щупов в макете канала печи спекания: 1, 6 – в зонах предварительного нагрева и охлаждения соответственно; 2 – 5 и 7 – 14 – в зоне спекания

Измерение концентрации кислорода в объеме макета канала осуществляли с помощью 14-ти пробоотборных щупов с внутренним диаметром 3 мм. Расположение щупов в макете канала показано на рис. 3. В зонах предварительного нагрева и охлаждения размещено по одному нерегулируемому щупу (1 и 6), в зоне спекания – четыре нерегулируемых щупа (2 – 5). С помощью этих щупов отбирали пробы газа в 20 мм над верхней поверхностью макета лодочек с подложками для изучения распределения концентрации кислорода по длине макета (координата X). Также в зоне спекания располагались восемь регулируемых щупов, позволяющих отбирать газ из заданной точки по высоте или ширине макета, меняя длину участка щупа, погруженного в макет канала. Наличие регулируемых щупов позволило провести более детальные измерения для исследования неравномерности и особенностей течения газов в канале печи.

С помощью регулируемых щупов 7 – 12 проводили измерения концентрации кислорода по высоте макета канала – от поверхности макета лодочек с подложками ($Y = 0$ мм) до верхней стенки ($Y = 90$ мм). Дополнительно были измерены концентрации кислорода ниже поверхности лодочек (от $Y = 0$ мм до $Y = -40$ мм) посредством регулируемых щупов 11 и 12. Для изучения распределения концентрации кислорода по ширине макета канала (от $Z = 0$ до $Z = 320$ мм) использовали регулируемые щупы 13 и 14. Группа щупов 10 – 13 расположена около узла подачи кислорода в зону спекания и состоит из трех вертикальных щупов и одного горизонтального. Исследования на этом участке важны, поскольку от того, как формируется поток кислорода в области его подачи, во многом зависят его движение и распределение по объему зоны спекания.

Концентрацию кислорода в аргоне измеряли с помощью газоанализатора GE Sensing Oxy.IQ с погрешностью $\pm 1\%$ в диапазоне концентраций кислорода от 0 до 100 об.%. Величину избыточного давления определяли с помощью датчика МИДА-ДА-15 с погрешностью $\pm 0,5\%$ в диапазоне от 0 до 0,16 МПа. Расходы газов измеряли ротаметрами типа РМ с погрешностью $\pm 2,5\%$ в диапазоне от 0 до 10 м³ (н.у.)/ч. Погрешность определения температуры с помощью термометра СП-2 составляла $\pm 1^\circ\text{C}$.

Перед проведением эксперимента была произведена сверка ротаметров с регулятором расхода Bronkhorst IN-FLOW F-202AI-M20-AGD-99-V. Эта процедура необходима в связи с тем, что ротаметры имеют индивидуальную калибровку шкалы расходов в зависимости от плотности измеряемого и калибровочного газа, которая определяется текущей температурой и давлением газа.

Стенд работает в автоматическом режиме с оцифровкой и регистрацией в ПЭВМ всех данных. Период опроса всех измерительных каналов – не более 2 с.

На стенде могут быть реализованы следующие режимы подачи газов:

– аргон со стороны зоны нагрева – от 1 до 8 м³ (н.у.)/ч;

ТОПЛИВНЫЙ ЦИКЛ И РАДИОАКТИВНЫЕ ОТХОДЫ

- аргон со стороны зоны охлаждения – от 1 до 8 м³ (н.у.)/ч;
- кислород – от 1 до 6 м³ (н.у.)/ч.

Избыточное давление в макете канала печи может изменяться от 100 до 10000 Па.

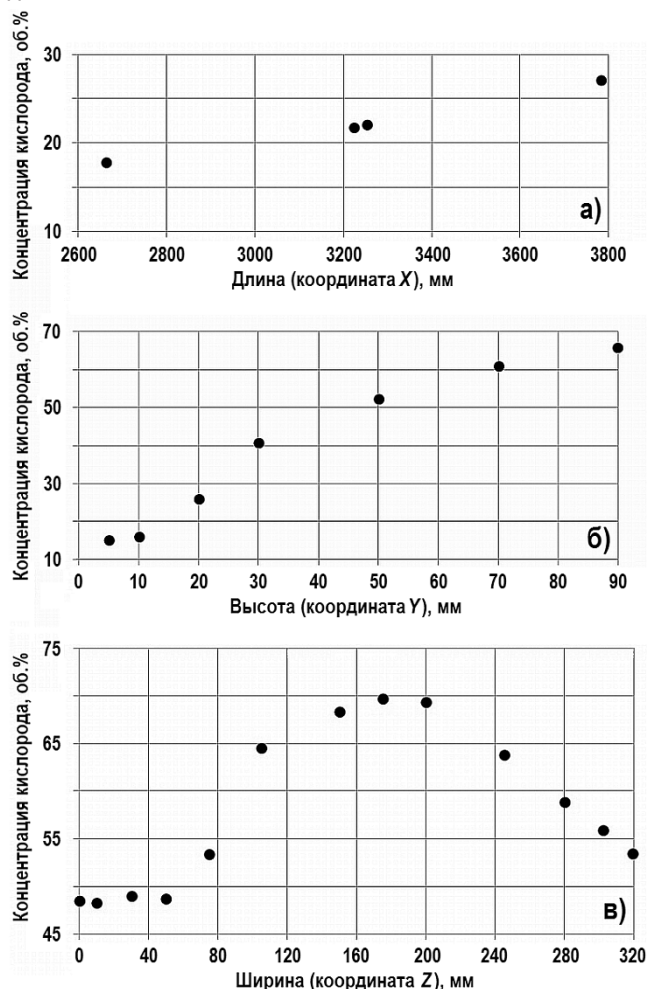


Рис. 4. Результаты измерения концентрации кислорода по длине (а), высоте (б) и ширине (в) макета канала печи спекания

На рисунке 4 приведено распределение концентрации кислорода в аргоне в зоне спекания, которое было получено для следующих технологических параметров стенда:

- расход аргона со стороны зоны нагрева 7,70 м³ (н.у.)/ч, со стороны зоны охлаждения – 4 м³ (н.у.)/ч;
- расход кислорода 4,67 м³ (н.у.)/ч;
- избыточное давление в макете канала печи 3000 ± 100 Па над атмосферным;
- температура 19,5°C.

С помощью нерегулируемых щупов 2 – 5 получено распределение газов по длине макета (рис. 4 а), с помощью регулируемых щупов 9 (рис. 4 б) и 13 (рис. 4 в) – по высоте и ширине соответственно.

Были проведены экспериментальные исследования, в ходе которых установлено, что по мере увеличения отношения расхода кислорода к расходу аргона со стороны зоны охлаждения с 1,2 до 1,6 происходит более интенсивное смешивание кислорода с аргонem. Концентрация кислорода в зоне спекания увеличивается, но при

этом концентрация кислорода в аргоне в зонах нагрева и охлаждения не превышает 0,1 об.%. (рис. 5).

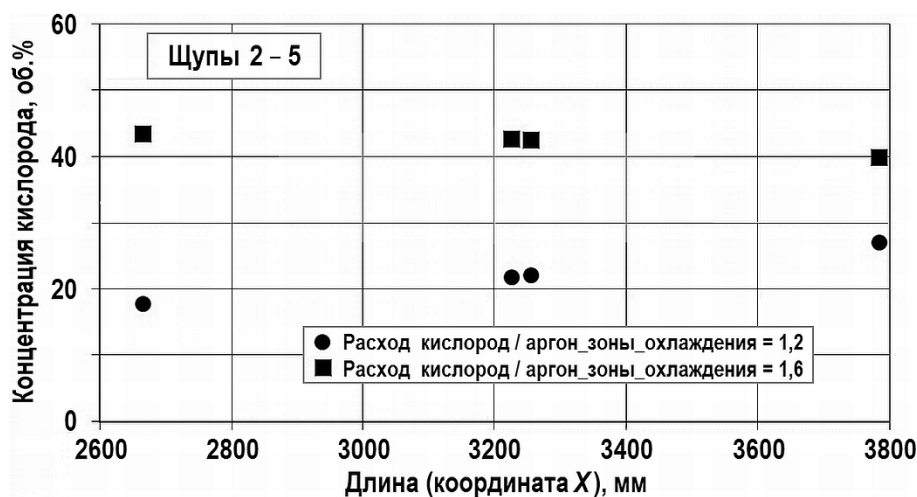


Рис. 5. Результаты измерения концентрации кислорода с помощью щупов 2 – 5 при изменении отношения расхода кислорода к расходу аргона, подаваемого со стороны зоны охлаждения

Для всех вариантов проведенных газодинамических исследований измеренное с помощью щупов 1 и 6 значение концентрации кислорода в зонах нагрева и охлаждения составляло менее 0,1 об.%.

Полученные экспериментальные данные по распределению газов в объеме макета канала печи могут быть использованы для валидации CFD-моделей канала печи спекания таблеток СНУП-топлива.

ВЫВОДЫ

1. Создан экспериментальный стенд, который позволяет проводить измерения концентрации технологических газов при различных режимах подачи газов в макете канала печи спекания таблеток СНУП-топлива при комнатной температуре. Стенд оснащен восемью регулируемыми и шестью нерегулируемыми щупами для пробоотбора газа. Конструкция макета канала печи спекания позволяет увеличить количество щупов для более детальных исследований.

2. Экспериментально доказана работоспособность барьеров, узлов подачи и отвода газов для обеспечения заданного состава газовых сред в зонах макета канала печи спекания. В зонах нагрева и охлаждения зафиксировано значение концентрации кислорода в аргоне менее 0,1 об.%. Установлено, что при увеличении отношения расхода кислорода к расходу аргона с 1,2 до 1,6 концентрация кислорода в зоне спекания увеличивается; при этом концентрация кислорода в аргоне в зонах нагрева и охлаждения не превышает 0,1 об.%.

3. По результатам газодинамических исследований на экспериментальном стенде получен необходимый объем данных по распределению концентрации кислорода в аргоне для валидации CFD-модели канала печи спекания таблеток СНУП-топлива.

Литература

1. Беззубцев В.С., Емельянов В.С., Адамов Е.О. Инновационный проект АЭС с реактором БРЕСТ и пристанционным топливным циклом. / Труды II Научной конференции Минатома России «Атомная энергетика. Состояние и перспективы», Москва, 5 июня 2002 г. – 85 с.
2. Елисеев В.А., Забудько Л.М., Мальшева И.В., Матвеев В.И. Нитридное топливо для перспективного быстрого натриевого реактора типа БН-1200. // Атомная энергия. – 2013. – Т. 114. – Вып. 5. – С. 266-271.

3. *Адамов Е.О., Забудько Л.М., Матвеев В.И., Рачков В.И., Троянов В.М., Хомяков Ю.С., Леонов В.Н.* Сравнительный анализ преимуществ и недостатков использования металлического и нитридного смешанного уран-плутониевого топлива в быстрых реакторах. // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2015. – № 2. – С. 3-15.
4. *Denisov A., Reynaud V., Smirnov V., Pavlov S., Renard F., Chamovskih Y., Sergeev N., Shkurin P., Davydov A., Glushenkov A.* Key features of design, manufacturing and implementation of laboratory and industrial equipment for Mixed Uranium-Plutonium Oxide (MOX) and Nitride fuel pellets fabrication in Russia. / International conference on fast reactors and related fuel cycles: next generation nuclear systems for sustainable development (FR17), Yekaterinburg, 26-29 June 2017. – IAEA-CN245-563.
5. *Bernard H., Bordello P., Warin D.* Mixed nitride fuels fabrication in Convention oxide line. / Proc. of the Technical Committee Meeting on Advanced Fuel for FBRs: Fabrication, Properties and their optimization. November 1987. – IAEA, Vienna. – 1988. – PP. 43-51.
6. *Silva G.R.C., Philips T., Dwyer J.J., Zurecki Z.* Techniques and tips to optimize, control and stabilize the atmosphere inside a continuous sintering furnace. / Mater. Sci. Forum. – Florianopolis – 2012. – Vol. 727-728. – PP. 404-411.
7. *Решетников Ф.Г., Бибилашвили Ю.К., Головнин И.С.* Разработка, производство и эксплуатация тепловыделяющих элементов энергетических реакторов. Книга 2. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – С. 104-107.
8. *IAEA-TECDOC-1686* Experience and trends of manufacturing technology of advanced nuclear fuels. – 2012. – PP. 52-55.
9. *Троянов В.М., Грачев А.Ф., Забудько Л.М., Скупов М.В., Киреев Г.А.* Программа и некоторые результаты дореакторных исследований смешанного нитридного уран-плутониевого топлива для быстрых реакторов. // Атомная энергия. – 2014. – Т. 117. – № 4. – С. 192-197.
10. *Arai Y., Fukushima S., Shiozawa K., Handa M.* Fabrication of (U, Pu)N fuel pellets. // Journal of Nuclear Materials. – 1989. – Vol. 168. – No. 3. – PP. 280-289.
11. *Streit M., Ingold F.* Nitrides as a nuclear fuel option. // Journal of the European Ceramic Society. – 2005. – Vol. 25. – PP. 2687-2692.
12. *Ganguly C., Hegde P., Sengupta A.* Preparation, characterization and out-of-pile property evaluation of (U,Pu)N fuel pellets. // Journal of Nuclear Materials. – 1991. – Vol. 178. – No. 2-3. – PP. 234-241.
13. *Алексеев С.В., Зайцев В.А.* Нитридное топливо для ядерной энергетики. – М.: Техносфера, 2013. – С. 130-134.
14. *Feldbauer L.* A review of the fundamentals of stainless steel brazing in a continuous style, controlled atmosphere brazing furnaces. / Proceedings of the IIIrd International brazing and soldering conference. – San Antonio TX, 2006. – ASM International. – PP. 334-337.
15. *Ansys Inc.* Ansys Fluent Theory Guide, Release 14.0. – USA: Ansys. – 2011. – 826 p.
16. *Леценко А.Ю., Павлов С.В., Шамсутдинов Р.Н.* Моделирование распределения газов в печи спекания для производства смешанного нитридного уран-плутониевого топлива. / Сб. тез. докл. VI Научного семинара «Моделирование технологий ядерного топливного цикла». – Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ, 2017. – С. 28.
17. *Ying L., Fu-Yong S., Zhi W., Zhi L., Hai-Quan Y., Xiao-Hong F.* CFD modeling of flow, temperature and concentration fields in a pilot-scale rotary hearth furnace. // Metallurgical and Materials Transactions B. – 2014. – Vol. 45. – No. 1. – PP. 251-261.
18. *Miaoren N., Zhuoyong Y., Qinghua G., Qinfeng L., Guangsuo Y., Fuchen W., Zunhong Y.* Experimental measurement of gas concentration distribution in an impinging entrained-flow gasifier. // Fuel Processing Technology. – 2008. – Vol. 89. – No. 11. – PP. 1060-1068.
19. *Zavila O., Blejchai. T.* Capacities and limitations of wind tunnel physical experiments on motion and dispersion of different density gas pollutants. // Measurement Science Review. – 2017. – Vol. 17. – No. 2. – PP. 53-60.
20. *Zavila O., Herecova L., Micek D., Hejzlar T.* Numerical simulation of heavy and light pollutants motion as a tool of experimental data verification. // Communications. – 2011. – Vol. 13. – No. 2. – PP. 37-43.

Поступила в редакцию 22.08.2018 г.

Авторы

Кузьмин Илья Васильевич, главный специалист отдела научных исследований и обоснования безопасности технологий
E-mail: kiv@sosny.ru

Лещенко Антон Юрьевич, главный специалист отдела научных исследований и обоснования безопасности технологий, канд. техн. наук
E-mail: lay@sosny.ru

Павлов Сергей Владленович, зам. директора по науке и технологиям, д.т.н.
E-mail: pavlov@sosny.ru

Шамсутдинов Ринат Нурисламович, инженер отдела научных исследований и обоснования безопасности технологий, аспирант
E-mail: srn@sosny.ru

Мочалов Юрий Серафимович, главный технолог проектного направления «Прорыв», канд. техн. наук
E-mail: info@proryv2020.ru

UDC 621.039

EXPERIMENTAL BENCH FOR GAS-DYNAMIC INVESTIGATIONS OF THE FURNACE CHANNEL FOR NUCLEAR FUEL PELLETS SINTERING

Kuzmin I.V.*, Leshchenko A.Y.*, Pavlov S.V.* **, Shamsutdinov R.N.* **, Mochalov Y.S.***

* Sosny R&D Company

4a Dimitrov av., Dimitrovgrad, Ul'yanovsk reg., 433507 Russia

** DETI MEPhI

294 Kuibyshev av., Dimitrovgrad, Ul'yanovsk reg., 433511 Russia

*** Innovation and Technology Center for Proryv Project

2/9 bld. 4 Malaya Krasnosel'skaya st., Moscow, 107140 Russia

ABSTRACT

The sintering of nuclear fuel pellets in high-temperature furnaces is strictly performed in the atmosphere with well-defined requirements on the gas composition in different temperature zones of the furnace. Implementation of the preset process regimes in the furnace for sintering mixed uranium-plutonium nitride (MUPN) fuel pellets is ensured by the selection of the layout of gas supply system, the design of barriers between different temperature zones, as well as by the design of gas supply and removal units. Computational CFD model in Ansys Fluent software was created and validated for verifying functionality of the technical solutions applied in the design of furnace channel for MUPN sintering. Mockup sintering furnace channel included in the structure of the experimental bench for gas dynamic studies was designed and fabricated for validating the CFD model.

Description of the design and technical features of the mockup bench for measuring gas concentrations in the mockup furnace channel for MUPN fuel sintering is presented in the paper. The results of the gas-dynamic studies obtained on the

experimental facility were used for computational and experimental substantiation of the technical solutions applied in the design of the sintering furnace channel. Functionality of the barriers for segregating the furnace, gas supply and removal units was experimentally tested. The obtained experimental data on the distribution of technological gas concentrations allow validating computational thermal physics and gas dynamics CFD models of the furnace channel for MUPN fuel sintering.

Key words: gas-dynamic investigations, sintering furnace, furnace channel, zone of furnace, mixed uranium-plutonium nitride fuel, modelling gas concentration distribution, measuring gas concentration, gas sampling, barrier.

REFERENCES

1. Bezzubcev V.S., Emel'janov V.S., Adamov E.O. Innovative Design of NPP with a BREST reactor and fuel cycle. *Proc. II science conference Minatom of Russia «Nuclear Energy. Status and Prospects»*. Moscow, 2002, 85 p. (in Russian).
2. Eliseev V.A., Zabud'ko L.M., Malysheva I.V., Matveev V.I. Nitride fuel for future fast sodium reactor BN-1200. *Atomnaya energiya*, 2013, v. 114, iss. 5, pp. 266-271 (in Russian).
3. Adamov E.O., Zabud'ko L.M., Matveev V.I., Rachkov V.I., Trojanov V.M., Homjakov Ju.S., Leonov V.N. Comparative study of advantages and disadvantages of the use of metal and mixed nitride uranium-plutonium fuel in fast reactors. *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Energetika*. 2015, no. 2, pp. 3-15 (in Russian).
4. Denisov A., Reynaud V., Smirnov V., Pavlov S., Renard F., Chamovskih Y., Sergeev N., Shkurin P., Davydov A., Glushenkov A. *Key features of design, manufacturing and implementation of laboratory and industrial equipment for Mixed Uranium-Plutonium Oxide (MOX) and Nitride fuel pellets fabrication in Russia*. International conference on fast reactors and related fuel cycles: next generation nuclear systems for sustainable development (FR17). Yekaterinburg, 2017. IAEA-CN245-563.
5. Bernard H., Bordello P., Warin D. Mixed nitride fuels fabrication in Conventional oxide line. *Proc. of a Technical Committee Meeting on Advanced Fuel for FBRs: Fabrication, Properties and their optimization*, 1987 (IAEA, Vienna, 1988), pp. 43-51.
6. Silva G.R.C., Philips T., Dwyer J.J., Zurecki Z. Techniques and tips to optimize, control and stabilize the atmosphere inside a continuous sintering furnace. *Mater. Sci. Forum*, Florianopolis. 2012, v. 727-728, pp. 404-411.
7. Reshetnikov F. G., Bibilashvili Yu. K., Golovin I. S. *Development, production, and operation of fuel elements of power reactors. Book 1*. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1995, pp. 104-107 (in Russian).
8. IAEA-TECDOC-1686 *Experience and trends of manufacturing technology of advanced nuclear fuels*. 2012, pp. 52-55.
9. Troyanov V.M., Grachev A.F., Zabudko L.M., Skupov M.V., Kireev G.A. Program and results of reactor tests of mixed nitride fuel for fast reactors. *Atomnaya energiya*. 2014, v. 117, no. 4, pp. 192-197 (in Russian).
10. Arai Y., Fukushima S., Shiozawa K., Handa M. Fabrication of (U, Pu)N fuel pellets. *Journal of Nuclear Materials*. 1989, v. 168, no. 3, pp. 280-289.
11. Streit M., Ingold F. Nitrides as a nuclear fuel option. *Journal of the European Ceramic Society*. 2005, v. 25, pp. 2687-2692.
12. Ganguly C., Hegde P., Sengupta A. Preparation, characterization and out-of-pile property evaluation of (U,Pu)N fuel pellets. *Journal of Nuclear Materials*. 1991, v. 178, no. 2-3, pp. 234-241.
13. Alekseev S.V., Zaytsev V.A. *Nitride Fuel for Nuclear Power*. Moscow. Technosfera Publ., 2013, pp. 130-134 (in Russian).
14. Feldbauer L. A review of the fundamentals of stainless steel brazing in a continuous style, controlled atmosphere brazing furnaces. *Proceedings of the IIIrd International brazing and soldering conference*, San Antonio TX, 2006, ASM International, pp. 334-337.
15. Ansys Inc. *Ansys Fluent Theory Guide, Release 14.0*. USA. Ansys, 2011, 826 p.
16. Leshchenko A.Y., Pavlov S.V., Shamsutdinov R.N. *Modelling of gas distribution in the*

furnace for MUPN sintering. Proc. of the VI scientific seminar «Modelling of technologies of the nuclear fuel cycle». Snezhinsk. RFYaC-VNIITF Publ., 2017, p. 28 (in Russian).

17. Ying L., Fu-Yong S., Zhi W., Zhi L., Hai-Quan Y., Xiao-Hong F. CFD modeling of flow, temperature and concentration fields in a pilot-scale rotary hearth furnace. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2014, v. 45, no. 1, pp. 251-261.

18. Miaoren N., Zhuoyong Y., Qinghua G., Qinfeng L., Guangsuo Y., Fuchen W., Zunhong Y. Experimental measurement of gas concentration distribution in an impinging entrained-flow gasifier. *Fuel Processing Technology*. 2008, v. 89, no. 11, pp. 1060-1068.

19. Zavila O., Blejchai. T. Capacities and limitations of wind tunnel physical experiments on motion and dispersion of different density gas pollutants. *Measurement Science Review*. 2017, v. 17, no. 2, pp. 53-60.

20. Zavila O., Herecova L., Micek D., Hejzlar T. Numerical simulation of heavy and light pollutants motion as a tool of experimental data verification. *Communications*. 2011, v. 13, no. 2, pp. 37-43.

Authors

Kuzmin Il'ya Vasil'evich, Chief Specialist

E-mail: kiv@sosny.ru

Leshchenko Anton Yurievich, Chief Specialist, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: lay@sosny.ru

Pavlov Sergej Vladlenovich, Deputy Director, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: pavlov@sosny.ru

Shamsutdinov Rinat Nurislamovich, Engineer, PhD Student

E-mail: srn@sosny.ru

Mochalov Yuriy Serafimovich, Chief Technology Officer of the Proryv Project, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: info@proryv2020.ru