

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ РАБОЧЕГО КАНАЛА ПЕЧИ СПЕКАНИЯ ТАБЛЕТОК СМЕШАННОГО НИТРИДНОГО УРАН-ПЛУТОНИЕВОГО ТОПЛИВА

Шамсутдинов Р.Н., Павлов С.В., Лещенко А.Ю., Кузьмин И.В.
(ООО НПФ «Сосны», Дмитровград, Россия)

Введение

Заключительным этапом технологического процесса фабрикации таблеток смешанного нитридного уран-плутониевого (СНУП) топлива является спекание таблеток в проходной печи толкательного типа [1, 2]. Спекание проводят в восстановительной атмосфере смеси газов – аргона, азота и водорода. Спекаемый продукт в автоматической высокотемпературной горизонтальной толкательной печи спекания последовательно проходит зоны предварительного нагрева, спекания и охлаждения, для каждой из которых определены требования по составу газовых сред [1, 2]:

- нагрев и охлаждение продукта должны осуществляться в атмосфере аргона с содержанием азота в аргоне менее 0,1% об.;
- спекание продукта должно осуществляться в азотно-аргоновой атмосфере с концентрацией азота не менее 50% об.

На рабочих температурах, которые могут достигать 1950 °С, проблематично проводить отбор газовых проб для контроля и управления технологическими процессами в печи в силу её конструктивных особенностей. При разработке печи принята концепция, по которой выполнение заявленных требований к составу газовых сред должно обеспечиваться с помощью принятых обоснованных научно-технических решений, что существенно упрощает эксплуатацию печи и повышает ее надежность.

Цель работы – разработка и расчетно-экспериментальное обоснование конструкции рабочего канала печи спекания СНУП топлива в части конструктивных и технологических решений, которые обеспечивают требуемый состав газовых сред в различных температурных зонах.

Концепция расчетно-экспериментального обоснования конструкции рабочего канала печи спекания

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- выбрана общая схема подачи газов (азотоводородная смесь, аргон) и предложены конструктивные решения для рабочего канала печи спекания. Разработана расчетная газодинамическая модель рабочего канала печи спекания в программном комплексе Ansys Fluent [3]. По результатам расчетных исследований определены геометрические и технологические параметры рабочего канала, для которых выполняются требования по составу газовых сред на рабочих температурах;
- для проверки построенной расчетной газодинамической модели создан экспериментальный стенд для проведения измерений концентраций модельных газов при комнатной температуре в макете рабочего канала печи спекания. В качестве модельных газов использовали аргон и кислород (вместо азотоводородной смеси). Данный выбор обусловлен техническими сложностями, связанными с измерением содержания азота в аргоне в широком диапазоне концентраций и незначительным различием физико-химических свойств кислорода и азота;

- получены экспериментальные данные по распределению концентрации кислорода в аргоне в макете рабочего канала при комнатной температуре. На основе полученных экспериментальных данных была произведена корректировка расчетной газодинамической модели в программном комплексе Ansys Fluent;
- реализованы конструктивные решения для рабочего канала в созданной печи спекания. Получены экспериментальные данные по распределению концентрации кислорода в аргоне в рабочем канале печи спекания при комнатной температуре;
- верифицирована расчетная газодинамическая модель рабочего канала печи спекания в Ansys Fluent и подтверждена её адекватность. Определены технологические параметры (расходы газов, избыточное давление) обеспечивающие выполнение установленных требований для состава газовых сред в рабочем канале печи спекания для рабочих температур.

На рисунке 1 приведен алгоритм расчетно-экспериментального обоснования конструкции рабочего канала печи спекания.



Рисунок 1 – Последовательность расчетно-экспериментального обоснования конструкции рабочего канала печи спекания

Общая схема подачи газовых сред в рабочий канал печи спекания

Печь спекания имеет герметичный корпус, который разделен на следующие зоны:

- зона предварительного нагрева;
- зона спекания;
- зона охлаждения.

В печь спекания подают аргон и азотоводородную смесь. Прессованные таблетки (U, Pu)N в лодочке после поступления в зону предварительного нагрева по мере движения в печи постепенно прогреваются в аргонной среде с содержанием азота в аргоне менее 0,1% об. После чего таблетки (U, Pu)N в лодочке должны поступать в зону спекания (температурная область 1850-1950 °С) и находиться в ней не менее 10 ч в азотно-аргонной атмосфере с концентрацией азота в аргоне не менее 50% об. [1, 2, 4]. После спекания продукт поступает в зону охлаждения, где происходит постепенное охлаждение таблеток (U, Pu)N в аргонной среде с содержанием азота в аргоне менее 0,1% об. Нагрев и охлаждения загруженного продукта в лодочках должны осуществляться в аргонной среде во избежание образования «полторных» нитридов.

Для обеспечения заданного состава газовых сред в рабочем канале печи спекания с учетом непрерывного движения лодочек с продуктом в ней была предложена следующая схема подачи газовых сред, представленная на рисунке 2 [5].

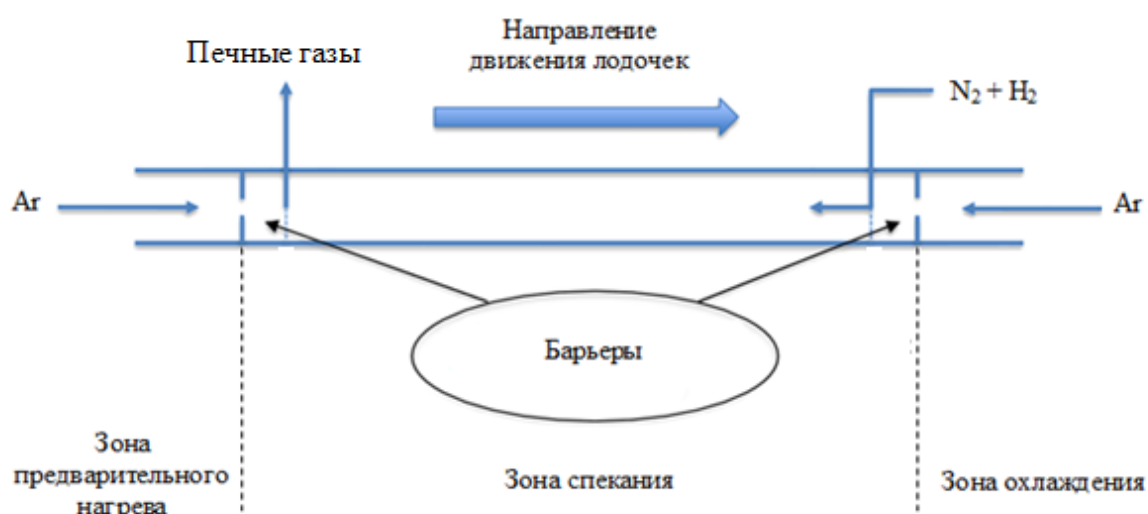


Рисунок 2 – Схема подачи газов в печь спекания

Для ограничения проникновения азотоводородной смеси в зоны предварительного нагрева и охлаждения из зоны спекания в рабочем канале печи спекания используются барьеры – участки по краям зоны спекания с уменьшенным проходным сечением. Подача азотоводородной смеси организована через распределительную систему каналов в барьере между зоной спекания и зоной охлаждения. Подача аргона осуществляется с торцов зон предварительного нагрева и охлаждения. Сброс газовых сред печи спекания осуществляется в зоне спекания ближе к барьеру со стороны зоны предварительного нагрева.

Расчетная газодинамическая модель рабочего канала печи спекания

Для расчетов использовался программный комплекс Ansys Fluent, предназначенный для решения широкого спектра задач вычислительной гидрогазодинамики. Для построения геометрии проточной области макета рабочего канала печи спекания использовалась система трехмерного проектирования SolidWorks.

Расчетная область представляет собой газовый объем прямоугольного канала переменного П-образного сечения. Расчетная неструктурированная сетка состоит из 5,2 миллионов ячеек. При проведении численных расчетов для аппроксимации

зависимостей плотности, коэффициентов вязкости, диффузии, теплопроводности и теплоемкости от температуры использовалась встроенная база данных Ansys Fluent.

Температурный профиль на стенках в расчетной модели канала (граничное условие) был задан с помощью запрограммированного UDF-файла (User-defined function – пользовательская функция).

В качестве граничных условий задавались нормальные объемные расходы для:

- аргона со стороны зоны предварительного нагрева в диапазоне от 1 до 10 м³ (н.у.)/ч;
- аргона со стороны зоны охлаждения в диапазоне от 1 до 6 м³ (н.у.)/ч;
- азотоводородной смеси, подаваемой в зону спекания через отверстия в барьере, в диапазоне от 1 до 6 м³ (н.у.)/ч;

Диапазон для избыточного давления в рабочем канале печи спекания выше атмосферного давления – от 1000 до 10000 Па.

В результате проведенных расчетных исследований были определены геометрия, значения подаваемых расходов и избыточного давления для рабочего канала печи спекания с учетом определенного рабочего температурного режима печи [5].

Экспериментальный стенд для газодинамических исследований при комнатной температуре. Результаты расчетно-экспериментальных исследований.

Для проверки построенной расчетной газодинамической модели рабочего канала печи в Ansys Fluent был создан экспериментальный стенд, с помощью которого были проведены экспериментальные исследования по измерению концентрации кислорода в аргоне при комнатной температуре в макете рабочего канала печи спекания. В состав экспериментального стенда входят – макет рабочего канала печи спекания (далее по тексту – макет) с установленными имитаторами подложек с лодочками и система измерения концентрации газов (рисунок 3).



Рисунок 3 – Экспериментальный стенд для газодинамических исследований

Макет воспроизводит основные геометрические размеры рабочего канала печи спекания (общая длина макета 7 м). Два имитатора подложек с лодочками с суммарной длиной 7 м используются для моделирования геометрии ряда загруженных СНУП топливом лодочек на подложках и для отбора проб газа в заданных точках в объеме макета – по 1 точке пробоотбора в зонах предварительного нагрева и охлаждения; 4 точки пробоотбора в зоне спекания (рисунок 4). В дальнейшем эти имитаторы подложек с лодочками были использованы для проведения измерений концентрации кислорода в аргоне при комнатной температуре в рабочем канале печи спекания.

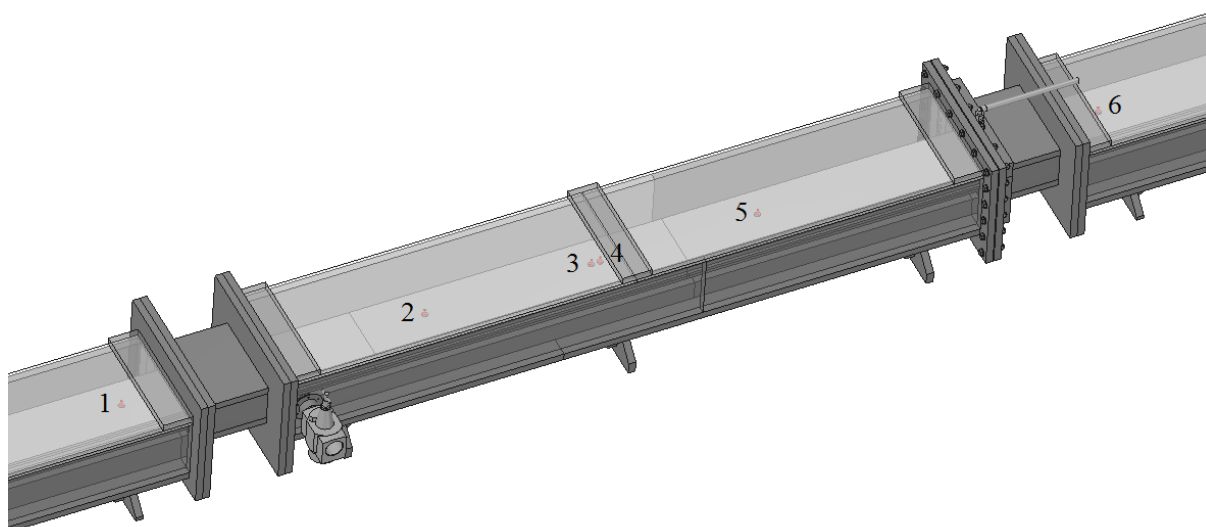


Рисунок 4 – Расположение точек пробоотбора 1-6, встроенных в имитаторы подложек с лодочками (имитаторы лодочек с подложками показаны в сборе с макетом)

Для герметизации, подачи газов и вывода пробоотборных линий от имитаторов подложек с лодочками к системе измерения концентрации газов в макете на его торцах установлены входной и выходной фланцы.

Особенностью экспериментального стенда является возможность проведения измерений концентрации газов по высоте и ширине канала макета. Для этого в корпусе макета в зоне спекания были установлены штуцеры с регулируемыми по высоте и ширине пробоотборными трубками, соединяемые с системой измерения концентрации газов (8 точек пробоотбора).

Система измерения концентрации газов предназначена для подачи модельных газов с заданными параметрами в макет рабочего канала печи спекания таблеток и измерения характеристик газовой среды в макете (давление, температура, расход и концентрация газа).

До проведения эксперимента на макете, в расчетной газодинамической модели рабочего канала печи спекания не учитывалась геометрия узла подачи азотоводородной смеси. Моделировались выходные отверстия распределительной системы каналов этого узла, на выходе которых задавался суммарный равномерно распределенный по всем отверстиям расход. В ходе первых экспериментов на макете была показана необходимость учета детальной геометрии распределительной системы каналов узла подачи азотоводородной смеси в расчетной газодинамической модели.

Значение расчетной и измеренной концентрации кислорода в аргоне в точках пробоотбора 1 (зона предварительного нагрева) и 6 (зона охлаждения) близко к 0 об.%. Расчетные и измеренные значения концентрации кислорода в аргоне в точках пробоотбора 2-5 (зона спекания) для одного из вариантов расчетно-экспериментальных испытаний приведены в качестве иллюстрации на рисунке 5. Относительное отклонение расчетных значений объемной концентрации кислорода в аргоне от измеренных в точках пробоотбора 2–5, которые предусмотрены для измерения концентраций кислорода в рабочем канале печи спекания не превышает 17 % (в абсолютных единицах 4,3 об.%). Таким образом, подтверждена корректность используемой расчетной методики, и созданная расчетная газодинамическая модель макета рабочего канала печи спекания позволяет прогнозировать распределение газов в нем с удовлетворительной точностью.

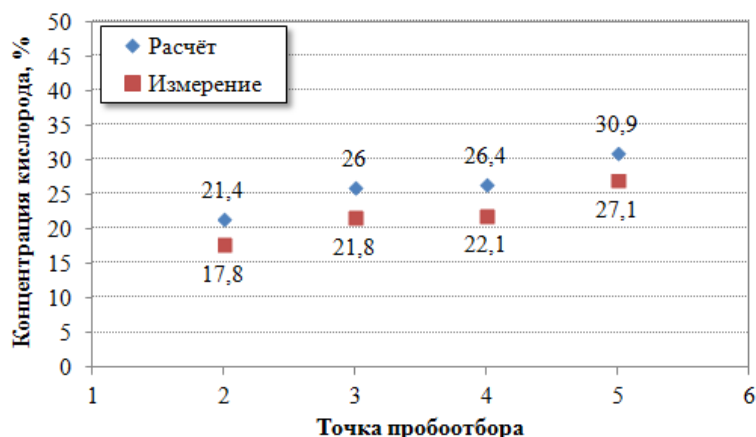


Рисунок 5 – Расчетные и измеренные значения объемной концентрации кислорода в точках пробоотбора 2–5 (зона спекания) в макете рабочего канала печи

Верификация расчетной газодинамической модели рабочего канала печи спекания

На созданной печи спекания модуля фабрикации/рефабрикации (МФР) опытно-демонстрационного энергокомплекса (ОДЭК) были проведены измерения концентрации кислорода в аргоне в рабочем канале печи при комнатной температуре (рисунок 6).



Рисунок 6 – Внешний вид печи спекания с установленным выходным фланцем

В качестве иллюстрации на рисунке 7 приведены расчетные и измеренные значения объемной концентрации кислорода в аргоне в рабочем канале печи спекания для одного из вариантов испытаний.

В точках пробоотбора 1 и 6 расчетные и измеренные значения объемной концентрации кислорода близки к 0 об.%, что соответствует требованиям к составу газовой среды в зонах предварительного нагрева и охлаждения печи спекания даже в отсутствие нагрева. Максимальное относительное отклонение расчетных значений объемной концентрации кислорода в аргоне от измеренных для всех вариантов испытаний не превышает 12 % (в абсолютных единицах 5 об.%). Относительное отклонение расчетных от измеренных значений уменьшается по мере увеличения соотношения подаваемых расходов кислорода к аргону со стороны зоны охлаждения.

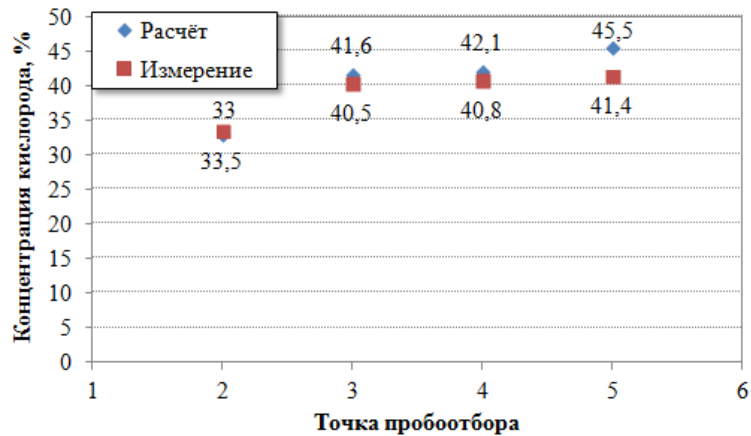


Рисунок 7 – Расчетные и измеренные значения объемной концентрации кислорода в точках пробоотбора 2-5 (зона спекания) в рабочем канале печи спекания

Полученные относительные отклонения расчетных от измеренных значений концентрации кислорода в точках пробоотбора 2-5 является подтверждением адекватности расчетной газодинамической модели рабочего канала печи спекания. Данная расчетная газодинамическая модель использована для обоснования технологических параметров (расходы газовых сред, избыточное давление), обеспечивающих выполнение установленных требований для состава газовых сред в рабочем канале печи спекания для рабочих температур.

Для выбранной геометрии рабочего канала печи спекания и подобранных расходов газов требования по составу газовых сред в различных температурных зонах рабочего канала выполняются. В качестве иллюстрации на рисунке 8 приведено распределение концентрации азота больше 50 об.% при рабочей температуре в зоне спекания.

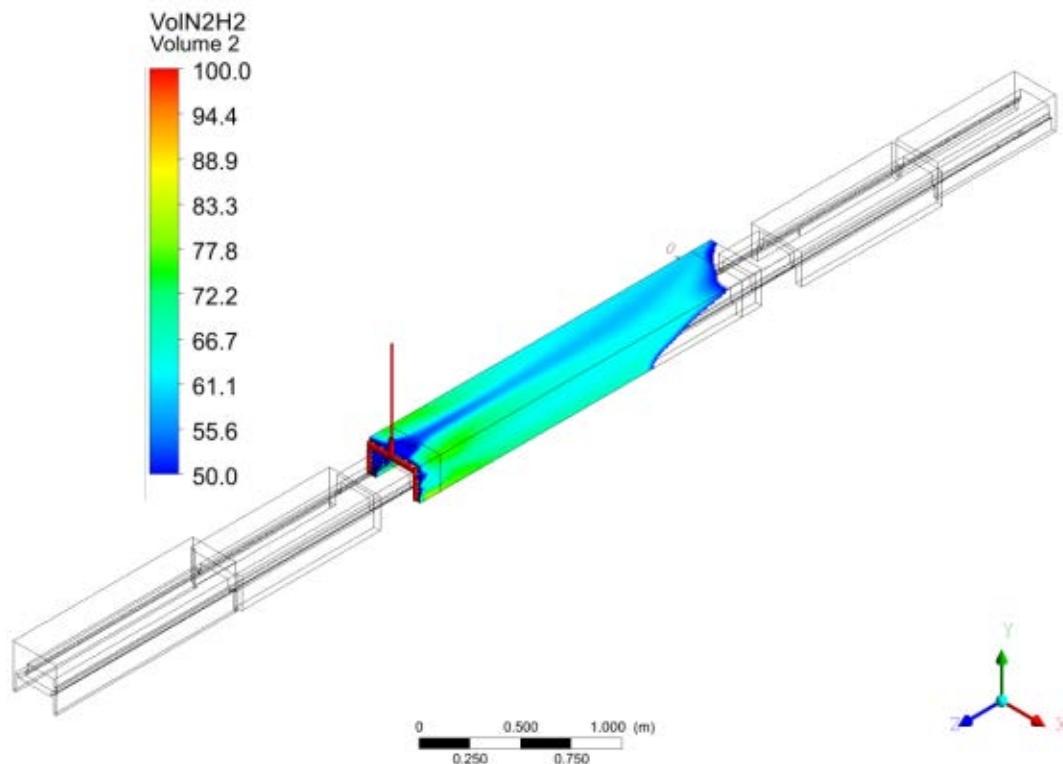


Рисунок 8 – Распределение концентрации азота при рабочей температуре в рабочем канале печи (объемная концентрация азота больше 50 об.%)

Заключение

Выполнен комплекс расчетно-экспериментальных исследований в обоснование конструкции рабочего канала печи спекания:

– по результатам расчетных исследований в программном комплексе Ansys Fluent для выбранной схемы подачи газов и принятых конструктивных решений (геометрия и расположение барьеров, мест подачи аргона и азотоводородной смеси, выходного отверстия для сдувки печных газов) для рабочего канала печи спекания разработана расчетная газодинамическая модель.

– для проверки построенной расчетной газодинамической модели рабочего канала печи спекания реализован экспериментальный стенд и получено удовлетворительное отклонение расчетных от измеренных значений концентраций кислорода в аргоне в точках пробоотбора 1-6 в макете рабочего канала печи спекания при комнатной температуре, которое не превышает 17 % (в абсолютных единицах 4,3 об.%).

– реализованы конструктивные решения для рабочего канала в созданной печи спекания и подтверждена адекватность расчетной газодинамической модели рабочего канала печи спекания на основе измеренных значений концентраций кислорода в аргоне в точках пробоотбора 1-6 при комнатной температуре. Максимальное относительное отклонение расчетных значений объемной концентрации кислорода в аргоне от измеренных в точках пробоотбора 1-6 не превышает 12 % (в абсолютных единицах 5 об.%).

– определены технологические параметры (расходы газов, избыточное давление) обеспечивающие выполнение установленных требований для состава газовых сред в рабочем канале печи спекания для рабочих температур.

Список литературы

1. Алексеев С.В., Зайцев В.А. Нитридное топливо для ядерной энергетики: Москва: Техносфера, 2013. – 240 с.
2. 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), IAEA-CN245-563, Yekaterinburg, 26-29 June 2017.
3. Ansys Inc. Ansys Fluent Theory Guide, Release 14.0. [Текст] USA: Ansys. – P.826. – 2011.
4. Шорников Д.П., Бурлакова М.А., Тарасов Б.А., Никитин С.Н., Якуткина Т.В., Юрлова М.С., Получение и компактирование методами плазменно-искрового и электроимпульсного спекания нанопорошков нитрида урана, Вектор науки ТГУ №3, 2013, с. 95-98.
5. Лещенко А.Ю., Павлов С.В., Шамсутдинов Р.Н. Моделирование распределения газов в печи спекания для производства смешанного нитридного уран-плутониевого топлива // Тезисы докладов VI научного семинара «Моделирование технологий ядерного топливного цикла». – Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ, 2017. – с. 28.