

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ
И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

УДК 621.039

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
РАЗНОНАПРАВЛЕННЫХ ПОТОКОВ ГАЗОВ В ПРЯМОУГОЛЬНОМ
КАНАЛЕ ПЕЧИ СПЕКАНИЯ ТАБЛЕТОК ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

© 2021 г. Р. Н. Шамсутдинов^{1,*}, С. В. Павлов¹, И. В. Кузьмин¹, А. Ю. Лещенко¹,
М. И. Ильяшик², М. К. Горбачев²

¹ООО НПФ “Сосны”, г. Дмитровград, 433507, Россия

²АО “Прорыв”, г. Москва, 107140, Россия

*e-mail: srn@sosny.ru

Поступила в редакцию 16.08.2021 г.

После доработки 17.08.2021 г.

Принята к публикации 24.08.2021 г.

Приведены результаты расчетно-экспериментального моделирования распределения концентрации кислорода в аргоне в макете канала и канале печи спекания таблеток нитридного уран-плутониевого топлива при комнатной температуре. Для расчетного моделирования была использована CFD-модель канала печи, разработанная в программном комплексе Ansys Fluent. В качестве экспериментальных данных для проверки и верификации CFD-модели использовались ранее полученные данные по распределению концентрации кислорода в аргоне на разработанном экспериментальном стенде для газодинамических исследований канала печи спекания таблеток нитридного уран-плутониевого топлива. Расчетно-экспериментальным путем показана принципиальная возможность реализации трехзонного разделения газовых сред в канале печи с заданными параметрами концентраций азота и аргона, требуемыми для спекания таблеток ядерного топлива. Разработанная CFD-модель удовлетворительно описывает газодинамические процессы в канале печи спекания: в зонах нагрева, спекания и охлаждения таблеток ядерного топлива. Наилучшее совпадение расчетных и экспериментальных значений концентрации наблюдается в центральной части канала (в области нахождения лодочек с таблетками ядерного топлива). Расчетные значения концентрации кислорода в аргоне практически везде превышают соответствующие экспериментальные значения за исключением нескольких точек у поверхности имитаторов подложек с лодочками около узла подачи кислорода. Разница между расчетными и экспериментальными значениями концентрации кислорода у поверхности имитаторов подложек с лодочками находится в диапазоне от 0.1 до 6.6 об. %. Созданная CFD-модель может быть использована для выбора параметров канала печи, обеспечивающих выполнение установленных требований для состава газовых сред на рабочих температурах.

Ключевые слова: CFD, распределение газов, канал печи, Ansys Fluent, моделирование

DOI: 10.1134/S2304487X21040118

ВВЕДЕНИЕ

Одной из актуальных задач в рамках реализации проекта “Прорыв” является создание модуля фабрикации/рефабрикации (МФР) таблеток нитридного уран-плутониевого топлива на площадке опытно-демонстрационного энергетического комплекса (ОДЭК) в городе Северск [1]. Ключевым элементом технологической цепочки оборудования МФР является высокотемпературная печь для спекания таблеток нитридного уран-плутониевого топлива [2]. Спекание таблеток в данной проходной печи толкательного типа проводится в непрерывном режиме. При разработке печи спекания были определены требования по обеспечению заданного состава газовых сред в

различных температурных зонах по всей длине канала печи [2–6]:

– нагрев и выдержка продукта должны осуществляться в атмосфере аргона с содержанием азота менее 0.1 об. %;

– спекание продукта в атмосфере смеси газов азот–аргон–водород с содержанием азота более 50 об. %.

Данные требования означают, что необходимо обеспечить трехзонное разделение газовых сред в канале печи спекания: аргон (зона 1)–водород–азот–аргон (зона 2)–аргон (зона 3). Для реализации трехзонного разделения газов в прямоугольном канале печи спекания были предложены но-

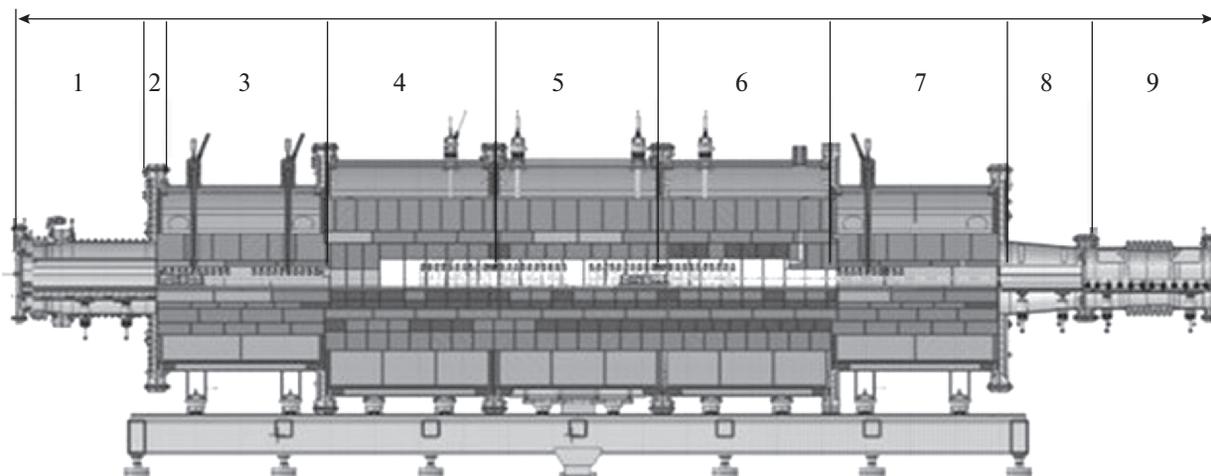


Рис. 1. 3D-модель печи спекания таблеток нитридного уран-плутониевого топлива: 1 – входной сильфон; 2 – входной модуль; 3 – модуль нагрева; 4 – вытяжной модуль; 5 – модуль спекания; 6 – модуль подачи газа; 7 – модуль охлаждения; 8 – выходной модуль; 9 – выходной сильфон.

вые технические решения, для проверки которых был создан экспериментальный стенд для газодинамических исследований макета канала печи спекания, подробное описание которого представлено в [6]. Макет воспроизводит внутренние размеры канала печи спекания в масштабе 1:1. На экспериментальном стенде был получен необходимый объем экспериментальных данных для проверки CFD-модели канала печи спекания [6].

В данной статье приведены результаты расчетно-экспериментального моделирования распределения концентрации модельных газов в макете канала печи спекания, которые были использованы для проверки разработанной CFD-модели и подтверждения принятых научно-технических решений по обеспечению трехзонного разделения газовых сред в канале печи спекания. Также представлены результаты верификации CFD-модели по результатам экспериментальных исследований на печи спекания.

ПЕЧЬ СПЕКАНИЯ ТАБЛЕТОК НИТРИДНОГО УРАН-ПЛУТОНИЕВОГО ТОПЛИВА

3D-модель печи спекания таблеток нитридного уран-плутониевого топлива представлена на рис. 1 [4].

Высокотемпературная горизонтальная толкательная печь предназначена для спекания таблеток нитридного уран-плутониевого топлива в восстановительной атмосфере (смесь газов из аргона, азота и водорода) при рабочей температуре до 1950°C с целью улучшения их физико-механических свойств (повышения плотности и механической прочности). Печь спекания имеет герметичный корпус, разделенный на зоны нагрева,

спекания и охлаждения, через которые последовательно проходит спекаемый продукт:

Каждая зона печи состоит из модулей. Согласно обозначениям на рис. 1:

- в состав зоны нагрева входят модули 1–3;
- в состав зоны спекания входят модули 4–6;
- в состав зоны охлаждения входят модули 7–9.

Кирпичная кладка из керамических материалов образует канал печи спекания. Температурное поле внутри канала печи формируется многосекционными независимыми электронагревателями, расположенными вертикально около боковых стенок канала.

Прессованные таблетки (U, Pu)N, размещенные в лодочках прямоугольной формы, после поступления в зону нагрева по мере движения в печи постепенно прогреваются в среде аргон–азот с содержанием азота менее 0.1 об. %. После этого таблетки (U, Pu)N в лодочках поступают в зону спекания (температурная область 1850–1950°C) и находятся в ней не менее 10 ч в атмосфере азот–аргон–водород с концентрацией азота в аргоне не менее 50 об. % [2–6]. 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. %.

Эффективность разделения газовых сред внутри канала печи определяется конструкцией барьеров, узлов подачи и отвода газов, а также параметрами печи (распределение температуры по объему канала, расход аргона и азотоводородной смеси, давление газов внутри канала печи) [6]. Схема подачи газовых сред в канал печи спекания приведена на рис. 2 [5].

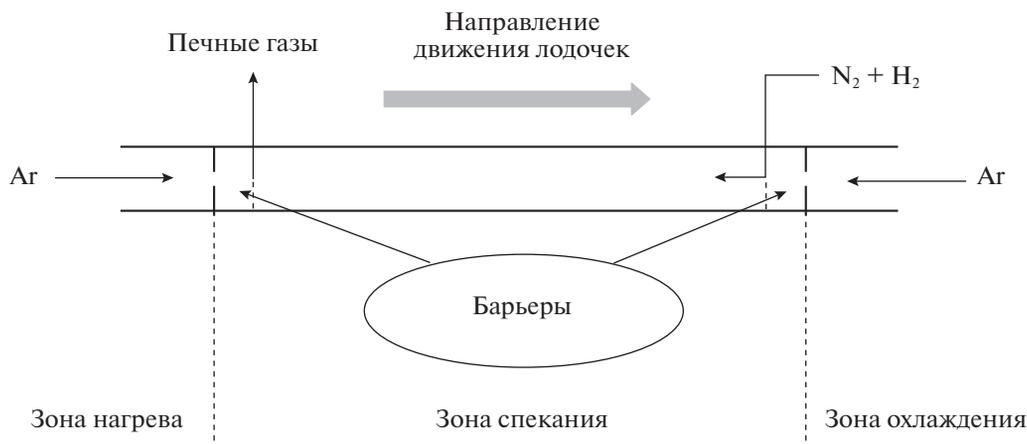


Рис. 2. Схема подачи газов в печь спекания.

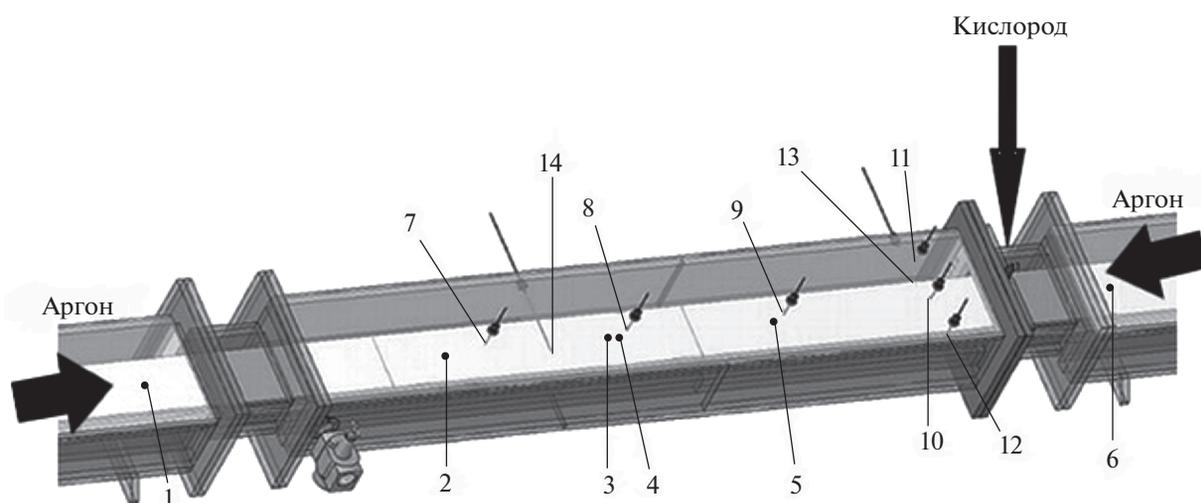


Рис. 3. Расположение пробортборных щупов в макете канала печи спекания: 1, 6 – в зонах предварительного нагрева и охлаждения, соответственно; 2 – 5 и 7 – 14 – в зоне спекания.

МАКЕТ КАНАЛА ПЕЧИ СПЕКАНИЯ ТАБЛЕТОК НИТРИДНОГО УРАН-ПЛУТОНИЕВОВОГО ТОПЛИВА

Макет воспроизводит внутренние размеры канала печи спекания в масштабе 1:1. Подробное описание экспериментального стенда для газодинамических исследований макета канала печи спекания приведено в [6]. Для измерения состава технологических газов в макете канала печи спекания использовали 14 пробортборных щупов (рис. 3). В зонах 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 имитаторов подложек с лодочками для изучения распределения концентрации кислорода по длине макета. Данные имитаторы подложек с лодочками и не-

подвижными пробортборными щупами также использовались в печи спекания. С помощью регулируемых щупов 7–12 и 13–14 проводили измерения по высоте и ширине макета канала печи, соответственно.

ВЫБОР МОДЕЛЬНОГО ГАЗА ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Ввиду малого содержания водорода (7 мас. %) в азотоводородной смеси, подаваемой в канал печи спекания, для экспериментальных исследований распределения газов в макете канала печи и канале печи спекания без нагрева использовался модельный газ без добавления водорода. В частности, вместо азотоводородной смеси использо-

вался кислород, выбор которого обусловлен следующими причинами:

- незначительное расхождение свойств кислорода и азота при комнатной температуре. Относительное отклонение значения плотности и коэффициента динамической вязкости кислорода от азота не превышает 13%, а коэффициента диффузии 1%;

- доступность газоанализаторов, позволяющих определять концентрацию кислорода в аргоне в широком диапазоне измерений от 0.0001 до 100% для обеспечения возможности непрерывного контроля концентраций газов в ходе экспериментального исследования;

- отсутствие газоанализаторов, позволяющих измерять содержание азота в аргоне в диапазоне от 0.01 до 100% (возможно использование только очень дорогих средств измерений типа масс-спектрометров или газовых хроматографов).

Поскольку свойства кислорода близки к свойствам азота, газодинамические процессы в макете канала печи принципиально протекают одинаково и замена газов не влияет на качество верификации теплофизической CFD-модели канала печи спекания. В качестве модельных газов использовались аргон, сорт 1 по ГОСТ 10157-79 и кислород технический, сорт 2 по ГОСТ 5583-78.

ФИЗИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В канал печи переменного П-образного сечения длиной L , разделенный барьерами (участки с меньшим проходным сечением) на три зоны (нагрева, спекания и охлаждения) подается:

- аргон с расходом $Q_{ар, нагр}$ и температурой $T_{ар, нагр}$ со стороны зоны нагрева;

- аргон с расходом $Q_{ар, охл}$ и температурой $T_{ар, охл}$ со стороны зоны охлаждения;

- кислород через систему из n распределенных отверстий с диаметрами d_n ($n = 14$), расположенных в П-образной области на барьере, с расходом $Q_{кисл}$ и температурой $T_{кисл}$ между зоной спекания и охлаждения.

Отвод подаваемых технологических газов осуществляется через отверстие диаметра d в зоне спекания ближе к зоне нагрева. Вдоль боковых стенок прямоугольного канала печи попарно (друг напротив друга) установлены проволочные зигзагообразные нагреватели:

- две пары нагревателей в зоне охлаждения с постоянной температурой $T_{нагр, 1}$ и $T_{нагр, 2}$ на каждой из пар;

- четыре пары нагревателей в зоне спекания с постоянной температурой $T_{спек}$;

- одна пара нагревателей в зоне охлаждения с постоянной температурой $T_{охл}$.

На нагреватели не подается электрическая мощность и их температура равна температуре газовых сред, подаваемых в канал печи (равна комнатной температуре). В случае задачи с макетом прямоугольного канала печи установлены только четыре пары нагревателей в зоне спекания.

Требуется найти распределение концентрации технологических газов в объеме прямоугольного канала печи в стационарном режиме его работы.

CFD-МОДЕЛЬ КАНАЛА ПЕЧИ СПЕКАНИЯ ТАБЛЕТОК НИТРИДНОГО УРАН-ПЛУТОНИЕВОГО ТОПЛИВА

3D CFD-модель канала печи спекания реализована в программном комплексе Ansys Fluent и представляет собой проточный объем канала печи [7] (рис. 4).

Моделируемые в программном комплексе Ansys Fluent газодинамические и теплофизические процессы в канале печи спекания описываются системой уравнений Навье–Стокса, осредненных по Рейнольдсу, которая включает в себя уравнения неразрывности, сохранения импульса, энергии и переноса компонентов, дополненные уравнением состояния идеального газа [8, 9]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho v) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \rho(v \nabla)v = -\nabla p + \nabla \tau + \rho g, \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla v(\rho E + p) = \nabla(k_{\text{eff}} \nabla T) + S_h, \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla(\rho v Y_i) = -\nabla J_i, \quad (4)$$

$$p = \frac{\rho R T}{M}, \quad (5)$$

где ρ – плотность газа, кг/м³, v – скорость потока газа, м/с, p – давление, Па,

$\tau = \mu \left[(\nabla v + \nabla v^T) - \frac{2}{3} \nabla v I \right]$ – вязкий тензор напряжения, м/с², μ – молекулярная вязкость, Па с, I – единичный тензор, g – ускорение свободного па-

дения, м/с², $E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2}$ – удельная энергия,

Дж/кг, h – удельная энтальпия, Дж/кг, k_{eff} – эффективный коэффициент теплопроводности (с учетом влияния турбулентности), Вт/(м К), T – температура, К, S_h – мощность источников тепла на единицу объема, Вт/м³, R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль К), M – молярная масса газа, кг/моль, Y_i – массовая концентрация i -компонента газовой смеси, мас. %,

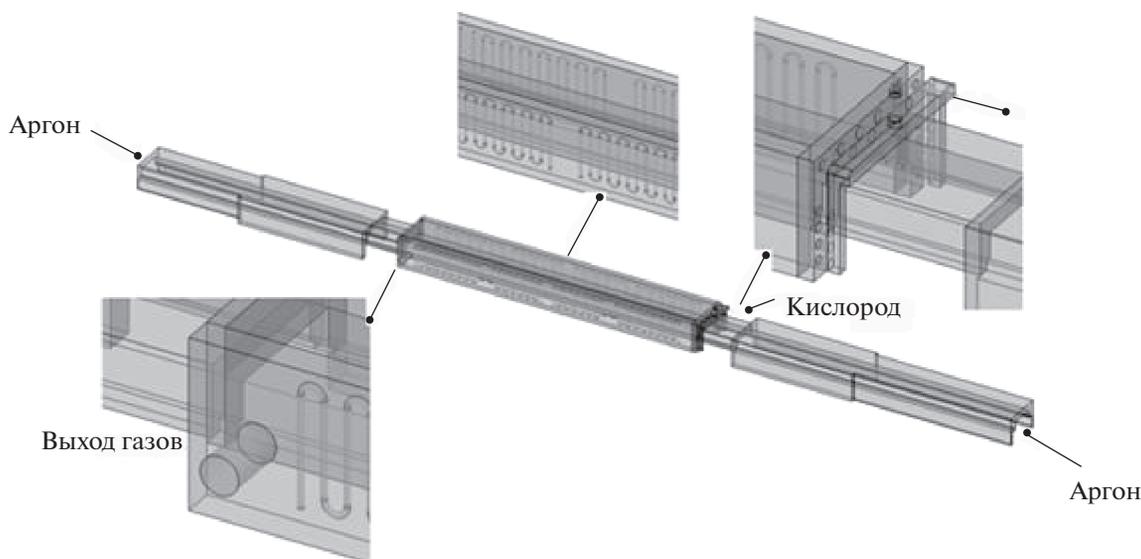


Рис. 4. 3D-модель макета канала печи спекания.

$$J_i = -\left(\rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{Sc_t}\right) \nabla Y_i - D_{T,i} \frac{\nabla T}{T}$$
 – диффузионный поток i -го компонента газовой смеси, обусловленный градиентом массовой концентрации, кг/м² с, $D_{i,m}$ – коэффициент диффузии для i -го компонента газовой смеси, м²/с, $D_{T,i}$ – коэффициент термодиффузии, м²/с, μ_t – турбулентная вязкость, Па с, $Sc_t = \frac{\mu_t}{\rho D_i}$ – турбулентное число

Шмидта (по умолчанию равно 0.7), D_i – турбулентный коэффициент диффузии, м²/с.

Двухпараметрическая realizable k-ε модель турбулентности используется для моделирования турбулентных и ламинарных течений [7, 10].

В качестве начальных условий для газовой среды в объеме канала печи задавалась температура $T(x, y, z, 0) = 20^\circ\text{C}$, давление $P(x, y, z, 0) = 101325$ Па и скорость $V(x, y, z, 0) = 0$ м/с, где x, y, z – координаты внутри расчетной области CFD-модели.

В качестве граничных условий на торцах канала печи (места подачи аргона) и поверхности патрубка подачи кислорода задается условие первого рода для скорости, давления и температуры: $V(x_B, y_B, z_B, t) = \text{const}$, $P(x_B, y_B, z_B, t) = \text{const}$ и $T(x_B, y_B, z_B, t) = \text{const}$, где x_B, y_B, z_B – координаты поверхности подачи газов. На выходе трубы отвода газов задается граничное условие второго рода $\partial V(x_{\text{вых}}, y_{\text{вых}}, z_{\text{вых}}, t) / \partial \mathbf{n} = 0$, $\partial T(x_{\text{вых}}, y_{\text{вых}}, z_{\text{вых}}, t) / \partial \mathbf{n} = 0$, $\partial P(x_{\text{вых}}, y_{\text{вых}}, z_{\text{вых}}, t) / \partial \mathbf{n} = 0$, где \mathbf{n} – вектор нормали к границе; $x_{\text{вых}}, y_{\text{вых}}, z_{\text{вых}}$ – координаты трубы отвода газов. Основные допущения: газы считаются сплошными однофазными ньютоновскими

несжимаемыми средами, стенки канала печи – гидравлически гладкие поверхности.

Для связи поля скоростей с полем давления использовался Coupled алгоритм [7]. Основным критерием сходимости является достижение невязок:

- для уравнения неразрывности, сохранения импульса, переноса турбулентных величин – значения 10^{-4} – 10^{-6} ;
- для уравнения энергии – значения 10^{-6} ;
- для уравнения переноса компонентов – значения 10^{-5} .

Сеточная модель представляет собой неструктурированную трехмерную расчетную сетку, большую часть которой составляют тетраэдры (рис. 5).

Для разрешения пристеночного вязкого слоя у внутренних границ сеточных моделей макета канала печи и канала печи во всех расчетных случаях значение безразмерного пристеночного расстояния y^+ не превышало 5 (фрагмент входной трубки для подачи кислорода (азотоводородной смеси) представлен на рис. 6). Согласно [9] данное условие является одним из критериев хорошо подобранной дискретизации пристеночной области расчетной сетки.

Для исследования сеточной сходимости были рассмотрены расчетные случаи с последовательным измельчением начальной сетки. В исследованиях сеточной сходимости для рассмотренных расчетных случаев размер элемента сетки в зоне спекания составлял 15, 10, 7.5, 5 и 4 мм, что составляет $0.11d$, $0.07d$, $0.06d$, $0.04d$ и $0.03d$, соответственно (d – гидравлический диаметр канала печи в зоне спекания).

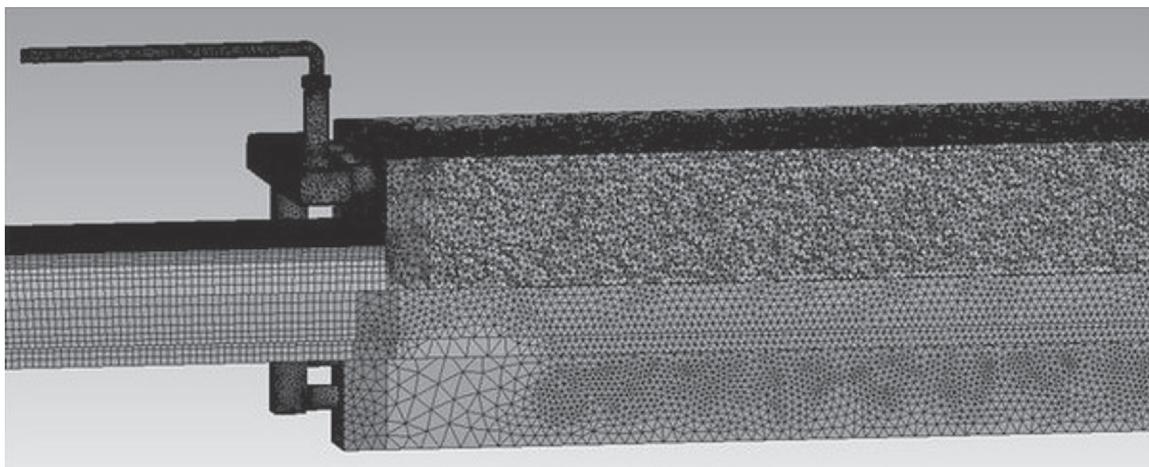


Рис. 5. Сеточная модель макета канала печи спекания.

По результатам исследования сеточной сходимости была выбрана расчетная сетка с размером элемента сетки в зоне спекания 5 мм. Это обусловлено тем, что относительное отклонение значения объемной концентрации кислорода в точке измерения в зоне спекания для сеток с размером элемента 7.5 мм от 5 мм составляет 4.2%, а для сеток с размером элемента 5 мм от 4 мм – 1.9%. В абсолютных значениях объемной концентрации кислорода эти отклонения составляют 0.91 и 0.41 об. % соответственно. К примеру, экспериментальная погрешность измерения объемной концентрации кислорода составляет ± 1 об. %. Размерность итоговой расчетной сетки макета канала печи спекания и канала печи спекания составляет 13.6 и 12.7 млн элементов.

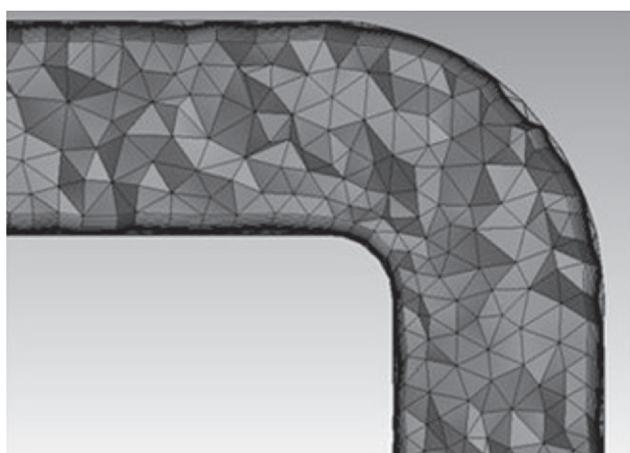


Рис. 6. Сеточное разрешение вязкого слоя у внутренних границ сеточной модели (трубка подачи кислорода (азотоводородной смеси)).

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ МОДЕЛЬНОГО ГАЗА В МАКЕТЕ КАНАЛА ПЕЧИ СПЕКАНИЯ

Проведен эксперимент на макете канала печи спекания при температуре 19.5°C с заданными расходами газов:

- расход аргона – со стороны зоны нагрева $7.70 \text{ н.м}^3/\text{ч}$;
- расход аргона со стороны зоны охлаждения $4 \text{ н.м}^3/\text{ч}$;
- расход кислорода – $4.67 \text{ н.м}^3/\text{ч}$.

Утечка газа из макета канала печи спекания, определенная перед проведением измерений, составила $1.13 \text{ н.м}^3/\text{ч}$, что не превышает 6.6% от суммарного подаваемого расхода.

Результаты расчетных и экспериментальных значений концентрации кислорода в точках пробоотбора 2–5 приведены на рис. 7.

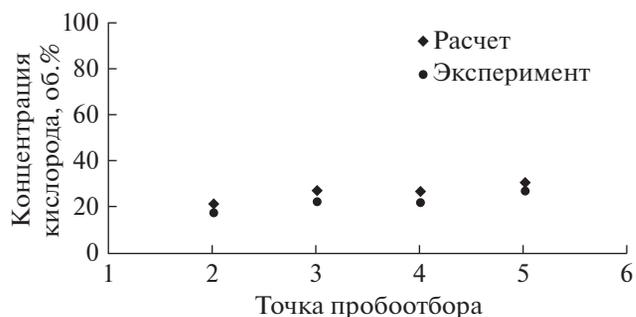


Рис. 7. Расчетные и измеренные значения объемной концентрации кислорода в точках пробоотбора 2–5.

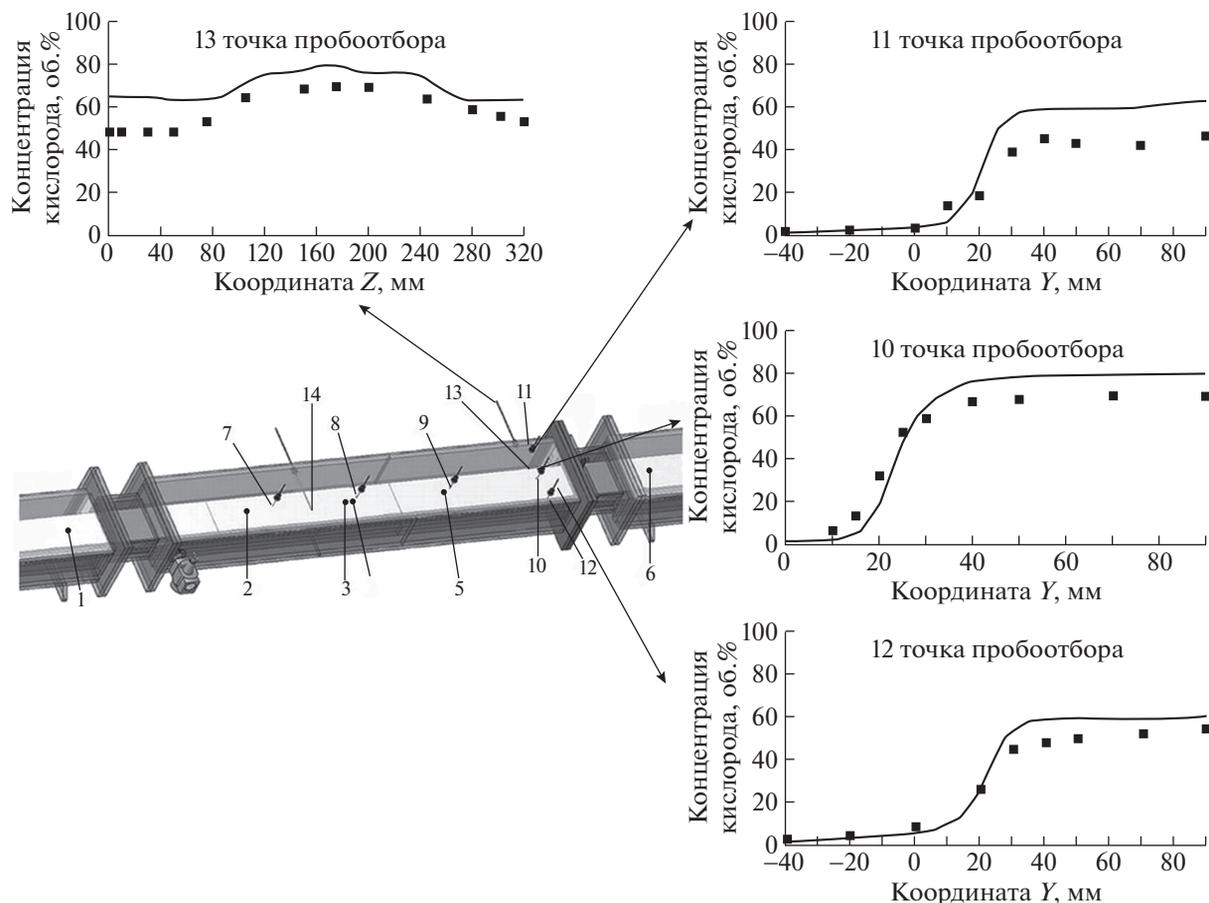


Рис. 8. Расчетные и измеренные значения объемной концентрации кислорода в точках пробоотбора 10–13: ■ — расчет, ■ — эксперимент.

Концентрация кислорода в зонах нагрева и охлаждения близка к нулю и определяется содержанием примесей в аргоне. Это свидетельствует о том, что требование по содержанию кислорода в этих зонах канала печи спекания не более 0.1 мас. % выполняется даже в отсутствие нагрева.

С помощью первой группы точек пробоотбора 10–13, которая расположена около узла подачи кислорода, получен набор данных по распределению концентрации кислорода в области формирования потока кислорода, который по мере его движения в сторону выхода газов определяет дальнейшее распределение концентрации кислорода в зоне спекания макета канала печи (рис. 8).

Измеренные значения кислорода в точках пробоотбора 10–13 свидетельствуют о том, что в эксперименте наблюдалось смещение потока кислорода в сторону стенки, где расположен выход газов из макета канала печи. Так, разница экспериментальных значений концентрации кислорода в точках пробоотбора 11 и 12 на высоте 90 мм составляет 8.9 об. %, а на высоте 70 мм – 10.9 об. %. При этом согласно полученным расчетным данным распределение концентрации

кислорода в точках пробоотбора 11 и 12 отличается незначительно (максимальная разница на высоте 90 мм – 1.6 об. %) и поток не смещен в сторону стенки, где расположен выход газов. Распределение концентрации кислорода в поперечном направлении (по ширине канала) характеризуется монотонным увеличением концентрации от горизонтальных стенок до максимума центра канала (точка пробоотбора 13). Необходимо отметить, что качественный характер изменения профиля концентрации кислорода по высоте в точках пробоотбора 10–13 носит идентичный характер для высоты пробоотбора больше 20 мм.

Как можно видеть на рис. 9, на участке макета канала печи спекания сразу после узла подачи кислорода наблюдается турбулентное движение газовых потоков. Это объясняется тем, что потоки кислорода, обладающего меньшей плотностью по сравнению с аргонem при комнатной температуре, поднимаются в верхнюю часть макета канала печи спекания. Данное обстоятельство оказывает влияние на распределение скоростей газов и концентрацию кислорода в сечениях точек пробоотбора 10–12 и 13. Согласно рис. 9 ос-

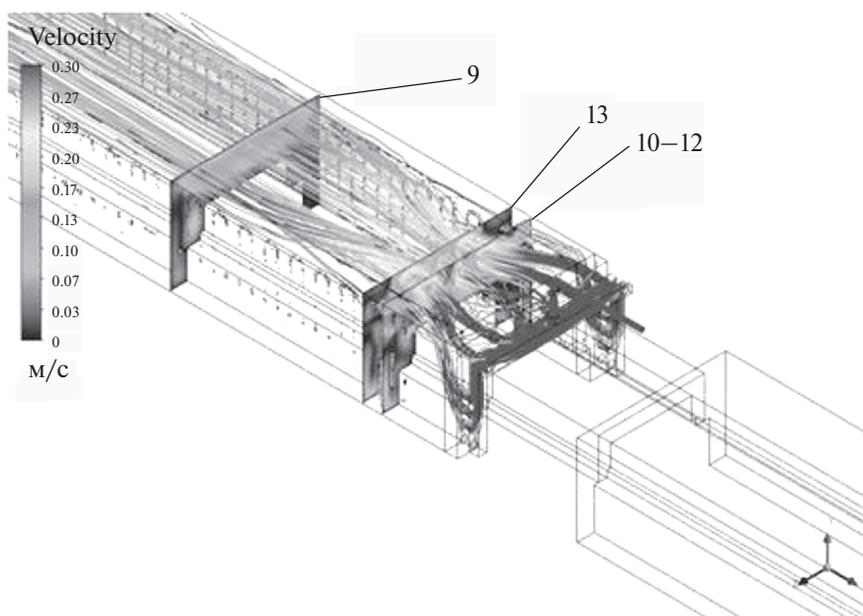


Рис. 9. Распределение скорости кислорода в макете канала печи спекания с обозначением сечений точек пробоотбора 9–13.

новой поток газа после узла подачи кислорода стабилизируется ближе к сечению точки пробоотбора 9.

Максимальная абсолютная разница расчетных и экспериментальных значений концентрации кислорода для точек пробоотбора 11, 10 и 12 для высоты больше 20 мм составляет 17.5, 10.6 и 10.2 об. %, соответственно. Более высокое расхождение расчетных и экспериментальных значений концентрации кислорода в точке пробоотбора 11 по сравнению с точками пробоотбора 10 и 12 указывает на скошенность потока газа на входном участке подачи кислорода, который был зафиксирован в эксперименте. В расчете, смещение газового потока и, соответственно, концентрации кислорода наблюдается ближе к выходу газов из макета канала печи спекания.

Следующая группа точек пробоотбора 7–9, представленная на рис. 10, характеризует изменение распределения концентрации кислорода по длине макета канала печи спекания. Максимальная абсолютная разница расчетных и экспериментальных значений концентрации кислорода для точек пробоотбора 7, 8 и 9 составляет 7.7, 6.3 и 10.0 об. %, соответственно. Причем данная разница наблюдается для точки пробоотбора 7 для высоты менее 20 мм, а для точек пробоотбора 8 и 9 для высоты более 70 мм, что также указывает на влияние возникающих пристеночных эффектов у стенок макета канала печи спекания на распределение концентрации кислорода. Тем не менее, согласно рис. 10 можно видеть хорошее совпадение профиля концентрации кислорода по высоте

макета канала печи спекания в точках пробоотбора 7–9. Концентрация кислорода монотонно увеличивается по высоте канала с постепенным уменьшением скорости изменения концентрации по мере приближения к верхней горизонтальной плоскости (потолку) канала

Полученные расчетные значения концентрации кислорода в точке пробоотбора 14 также указывают на то, что происходит смещение потока кислорода в сторону стенки, где расположен выход газов из макета канала печи (рис. 11). Однако согласно экспериментальным значениям концентрации кислорода в этой точке пробоотбора наблюдается их незначительный рост по ширине макета канала печи спекания, за исключением двух положений точки пробоотбора на расстоянии 315 мм и около стенки, где расположен выход газов. В этих двух положениях точки пробоотбора экспериментальные значения концентрации кислорода отклоняются от растущего тренда концентраций в точке пробоотбора 14. С учетом полученных значений концентрации кислорода в точках пробоотбора 11 и 12 ожидалось, что должен сохраняться растущий тренд концентрации кислорода по ширине макета канала печи спекания в точке пробоотбора 14. Таким образом, движение газовых сред в макете канала печи спекания имеет сложный характер, и пристеночные эффекты оказывают определенное влияние на распределение концентрации кислорода вдоль его стенок. Данный факт указывает на необходимость проведения дополнительных исследований данных эффектов.

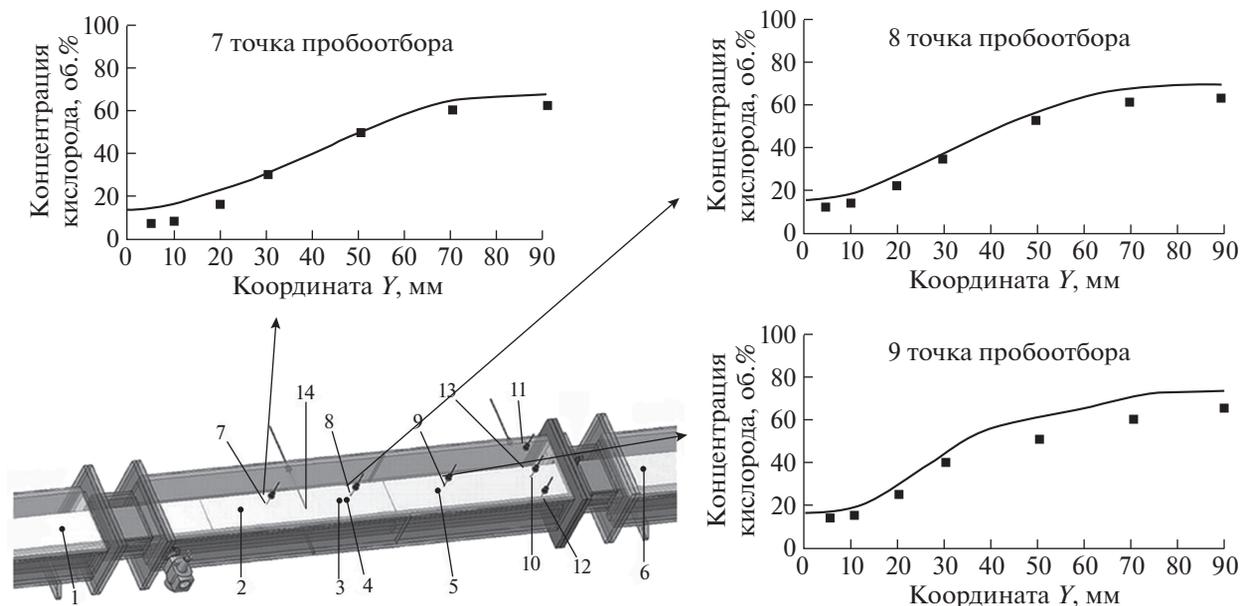


Рис. 10. Расчетные и измеренные значения объемной концентрации кислорода в точках пробоотбора 7–9: ■■ – расчет, ■ – эксперимент.

Таким образом, на основе полученных расчетно-экспериментальных результатов на макете канала печи спекания показано, что для принятых научно-технических решений (конструкция барьеров, узлов подачи и отвода газа) возможно реализовать трехзонное разделение газов в канале печи спекания таблеток ядерного топлива (аргон–кислород (азотоводородная смесь)–аргон) даже в отсутствие нагрева. Данные технические решения были реализованы в печи спекания.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ МОДЕЛЬНОГО ГАЗА В КАНАЛЕ ПЕЧИ СПЕКАНИЯ

Проведен эксперимент на печи спекания при температуре 21°C с заданными расходами газов:

- расход аргона со стороны зоны предварительного нагрева – 8 н.м³/ч;
- расход аргона со стороны зоны охлаждения – 4 н.м³/ч;
- расход кислорода через патрубок подачи азотоводородной смеси – 5 н.м³/ч;
- избыточное давление в печи спекания – (3000 ± 100) Па.

Результаты расчетных и экспериментальных значений концентрации кислорода в точках пробоотбора 2–5 приведены на рис. 12. В точках пробоотбора 1 и 6 расчетные и экспериментальные 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.

Максимальная абсолютная разница расчетных и экспериментальных значений объемной концентрации кислорода в точках пробоотбора 2–5 не превышает 4.1 об. %. Полученная абсолютная разница расчетных и экспериментальных значений концентрации кислорода в точках пробоотбора 2–5 является подтверждением адекватности разработанной CFD-модели канала печи спекания.

Данная CFD-модель канала печи спекания была использована для выбора параметров печи (расходы газовых сред, избыточное давление, распределение температуры), обеспечивающих выполнение установленных требований для со-

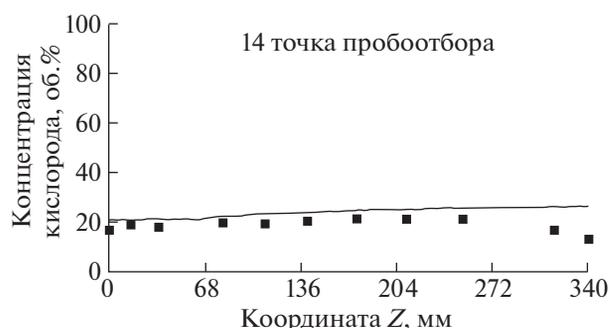


Рис. 11. Расчетные и измеренные значения объемной концентрации кислорода в точке пробоотбора 14: ■■ – расчет, ■ – эксперимент.

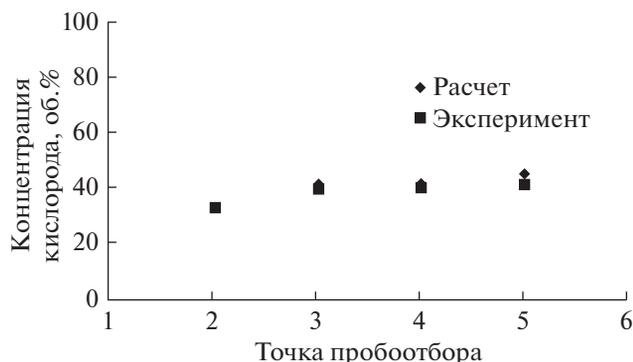


Рис. 12. Экспериментальные и расчетные значения объемной концентрации кислорода в канале печи спекания.

става газовых сред в канале печи спекания для рабочих температур.

ВЫВОДЫ

1. Распределение концентрации и картина течения двух газов (кислорода и аргона) в объеме канала печи (в частности, в зоне спекания таблеток) носят сложный характер, который определяется схемой подачи и отвода газов из зоны спекания, а также геометрической формой канала печи.

2. Наиболее сложное течение газов наблюдается в области зоны спекания сразу после подачи кислорода через отверстия в барьере между зоной спекания и зоной охлаждения:

- концентрация кислорода монотонно увеличивается по высоте канала с постепенным уменьшением скорости изменения концентрации по мере приближения к верхней горизонтальной плоскости (потолку) канала;

- распределение концентрации кислорода в поперечном направлении (по ширине канала) характеризуется монотонным увеличением концентрации от вертикальных стенок до максимума в центре канала.

3. По мере движения газов вдоль канала в направлении барьера между зоной спекания и нагрева потоки кислорода и аргона перемешиваются, что приводит к некоторому выравниванию их концентрации в объеме канала печи. Перепад концентрации кислорода по высоте и ширине канала печи заметно уменьшается.

4. Разработанная CFD-модель удовлетворительно описывает газодинамические процессы в канале печи спекания: в зонах нагрева, спекания и охлаждения таблеток ядерного топлива. Наиболее совпадение расчетных и экспериментальных значений концентрации кислорода в аргоне наблюдается в центральной части канала (в области нахождения лодочек с таблетками ядерного

топлива). Расчетные значения концентрации кислорода в аргоне практически везде превышают соответствующие экспериментальные значения за исключением нескольких точек у поверхности имитаторов подложек с лодочками около узла подачи кислорода. Разница между расчетными и экспериментальными значениями концентрации кислорода у поверхности имитаторов подложек с лодочками находится в диапазоне от 0.1 до 6.6 об. %. Максимальное расхождение расчетных и экспериментальных значений концентрации кислорода (до 17.5 об. %) наблюдается в пристеночных областях канала печи в зонах подачи кислорода и отвода газов. Для анализа причин этих расхождений требуются дополнительные исследования и совершенствование созданной CFD-модели.

5. Расчетно-экспериментальным путем показана принципиальная возможность реализации трехзонного разделения газовых сред в канале печи с заданными параметрами концентраций азота и аргона, требуемыми для спекания таблеток ядерного топлива.

Разработанная и верифицированная CFD-модель может быть использована для выбора оптимальных параметров эксплуатации печи спекания таблеток ядерного топлива, будущих разработок и совершенствования подобного оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Adamov E.O.* Closed fuel cycle technologies based on fast reactors as the corner stone for sustainable development of nuclear power // Proceedings of an International conference on fast reactors and related fuel cycles: next generation nuclear systems for sustainable development (FR17). Yekaterinburg, 2017. P. 17–34.
2. *Denisov A.L., Reynaud V., Smirnov V.P., Pavlov S.V., Reynard F., Chamovskih Y.V., Sergeev N.G., Shkurin P.A., Davydov A.V., Glushenkov A.E.* 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 // Proceedings of an International Conference on fast reactors and related fuel cycles: next generation nuclear systems for sustainable development (FR17). Yekaterinburg, 2017.
3. *Алексеев С.В., Зайцев В.А.* Нитридное топливо для ядерной энергетики. М., Техносфера, 2013. 246 с.
4. *Леценко А.Ю., Павлов С.В., Шамсутдинов Р.Н.* Моделирование распределения газов в печи спекания для производства смешанного нитридного уран-плутониевого топлива // Сборник тезисов докладов VI научного семинара “Моделирование технологий ядерного топливного цикла”. Снежинск, 2017. С. 28.
5. *Шамсутдинов Р.Н., Павлов С.В., Леценко А.Ю., Кузьмин И.В.* Расчетно-экспериментальное обоснование конструкции рабочего канала печи спекания таблеток смешанного нитридного уран-плутониевого топлива // Сборник докладов V международ-

- ной научно-технической конференции “Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики”. Москва, 2018. С. 1528–1535.
6. Кузьмин И.В., Леценко А.Ю., Павлов С.В., Шамсутдинов Р.Н., Мочалов Ю.С. Экспериментальный стенд для газодинамических исследований канала печи спекания таблеток ядерного топлива // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2018. № 4. С. 53–63.
 7. *Ansys Inc.* Ansys Fluent Theory Guide, Release 14.0. USA. Ansys, 2011. 826 p.
 8. *Roache P.J.* Fundamentals of computational fluid dynamics. Albuquerque, New Mexico: Hermosa Publishers, 1998. P. 648.
 9. *Федорова Н.Н.* Основы работы в Ansys 17. Москва. ДМК Пресс, 2017. 210 с.
 10. *Wilcox D.C.* Turbulence Modeling for CFD. La Canada, California: DCW Industries, 1998. P. 460.

Vestnik Natsional'nogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta “MIFI”, 2021, vol. 10, no. 4, pp. 363–374

Computational and Experimental Modeling of Multidirectional Gas Flows inside a Rectangular Furnace Channel for Sintering Nuclear Fuel Pellets

R. N. Shamsutdinov^{a,#}, S. V. Pavlov^a, I. V. Kuzmin^a, A. Yu. Leshchenko^a, M. I. Ilyashik^b, and M. K. Gorbachev^b

^a Sosny R&D Company, Dimitrovgrad, Ul'yanovskaya oblast, 433507 Russia

^b Proryv Company, Moscow, 107140 Russia

[#]e-mail: srn@sosny.ru

Received August 16, 2021; revised August 17, 2021; accepted August 24, 2021

Abstract—The oxygen concentration distribution in argon inside the mockup channel and the furnace channel for sintering uranium-plutonium nitride fuel pellets at room temperature is modeled numerically and experimentally. The numerical modeling is performed within the CFD model of the furnace channel developed with Ansys Fluent software. The CFD model is tested and verified using previous experimental data on the distribution of oxygen concentrations in argon obtained on a specifically designed test bench for gas-dynamic studies of the furnace channel for sintering uranium-plutonium nitride fuel pellets. The study reports the calculated and experimental possibility in principle to implement a three-zone separation of gases in a furnace channel with specific nitrogen and argon concentrations required for sintering nuclear fuel pellets. The CFD model satisfactorily describes the gas-dynamic processes in the sintering furnace channel in the fuel pellet heating, sintering, and cooling zones. The best agreement between the calculated and experimental concentrations is reached in the central part of the channel (in the area of location of the fuel pellet boats). The calculated concentrations of oxygen in argon exceed the experimental ones almost everywhere, except for several points on the surface of the supporting plates with boat dummies near the oxygen supply unit. The difference between the calculated and experimental oxygen concentrations on the surface of the supporting plates with the boat dummies is in the range from 0.1 to 6.6 vol %. The CFD model can be used to select the parameters for the furnace channel to ensure compliance with the established requirements for the composition of gaseous media at operating temperatures.

Keywords: CFD, gas distribution, furnace channel, Ansys Fluent, modeling

DOI: 10.1134/S2304487X21040118

REFERENCES

1. Adamov E.O. Closed fuel cycle technologies based on fast reactors as the corner stone for sustainable development of nuclear power. *Proceedings of an International conference on fast reactors and related fuel cycles: next generation nuclear systems for sustainable development (FR17)*, Yekaterinburg, 2017, pp. 17–34.
2. Denisov A.L., Reynaud V., Smirnov V.P., Pavlov S.V., Renard F., Chamovskih Y.V., Sergeev N.G., Shkurin P.A., Davydov A.V., Glushenkov A.E. 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. *Proceedings of an International Conference on fast reactors and related fuel cycles: next generation nuclear systems for sustainable development (FR17)*. Yekaterinburg, 2017.
3. Alekseev S.V., Zajcev V.A. *Nitridnoe toplivo dlya yadernoj energetiki* [Nitride fuel for nuclear energetics]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2013, p. 246.
4. Leshchenko A.Yu., Pavlov S.V., Shamsutdinov R.N. Modelirovanie raspredeleniya gazov v pechi spekaniya

- dlya proizvodstva smeshannogo nitridnogo uran-plutoniyevo go topliva [Modeling gas distribution inside a sintering furnace for production of mixed nitride uranium-plutonium fuel], *Sbornik tezisov dokladov VI nauchnogo seminara "Modelirovanie tekhnologij yadernogo toplivnogo cikla"*, Snezhinsk, 2017, p. 28 (in Russian).
5. Shamsutdinov R.N., Pavlov S.V., Leshchenko A.Yu., Kuzmin I.V. Raschetno-eksperimental'noe obosnovanie konstrukcii raboche go kanala pechi spekaniya tabletok smeshannogo nitridnogo uran-plutoniyevo go topliva [Computational and experimental justification of furnace channel design for sintering of mixed uranium-plutonium nitride fuel pellets], *Sbornik dokladov V mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii "Innovacionnye proekty i tekhnologii yadernoj energetiki"*, Moscow, 2018, pp. 1528–1535 (in Russian).
 6. Kuzmin I.V., Leshchenko A.Yu., Pavlov S.V., Shamsutdinov R.N., Mochalov Yu.S. Eksperimental'nyj stand dlya gazodinamicheskikh issledovaniy kanala pechi spekaniya tabletok yadernogo topliva [Experimental bench for gas-dynamic investigations of the furnace channel for nuclear fuel pellets sintering]. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*, 2018, № 4, pp. 53–63. (in Russian)
 7. Ansys Inc. *Ansys Fluent Theory Guide, Release 14.0*. USA. Ansys, 2011. 826 p.
 8. Roache P.J. *Fundamentals of computational fluid dynamics*. Albuquerque, New Mexico: Hermosa Publishers, 1998. p. 648.
 9. Fedorova N.N. *Osnovy raboty v Ansys 17* [Ansys 17 basics], Moscow, DMK Press Publ., 2017. p. 210.
 10. Wilcox D.C. *Turbulence Modeling for CFD*. La Canada, California, DCW Industries, 1998. p. 460.