

РАЗРАБОТКА И ВЕРИФИКАЦИЯ CFD-МОДЕЛИ ПЕЧИ КАРБОТЕРМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА НИТРИДОВ УРАНА И ПЛУТОНИЯ

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

* ООО НПФ «Сосны»

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

** ДИТИ НИЯУ МИФИ

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



Ретортная садочная печь для карботермического синтеза нитридов урана и плутония является составной частью цепочки оборудования модуля фабрикации (рефабрикации) (МФР) смешанного нитридного уран-плутониевого (СНУП) топлива опытно-демонстрационного энергетического комплекса (ОДЭК). Для проверки реализуемости заданных теплофизических режимов работы печи (скорость нагрева и охлаждения, температура на загруженном в печь продукте) была создана CFD-модель печи в программном комплексе SolidWorks Flow Simulation. Выполнена верификация разработанной CFD-модели и подтверждена ее адекватность на основании экспериментальных данных, полученных при испытаниях печи в рабочем режиме. Относительное отклонение расчетных значений температуры загруженного продукта от экспериментальных значений в процессе изотермической выдержки не превышает 0,7%.

Расчетные оценки значений температуры загруженного продукта, полученные с помощью созданной CFD-модели, были использованы для обоснования принятых конструкторских решений в печи карботермического синтеза нитридов урана и плутония. CFD-модель может быть использована для выбора режима эксплуатации печи путем подбора значений расхода газов, подаваемых в ретортное и заретортное пространство, температуры нагревателей, скорости нагрева и охлаждения загруженного в печь продукта.

Ключевые слова: CFD-модель, СНУП-топливо, SolidWorks Flow Simulation, печь, карботермический синтез, математическая модель, сеточная модель.

ВВЕДЕНИЕ

На протяжении последних трех десятилетий все чаще используются методы вычислительной гидродинамики (Computational Fluid Dynamics) для расчетного обоснования конструктивных решений при проектировании различных объектов промышленности [1 – 4]. Применение современных CFD-кодов позволяет моделировать явления тепломассопереноса, гидро- и газодинамики, которые трудно воспроизвести экспериментальным путем. Результаты CFD-моделирования позволяют осуществить выбор приемлемых конструктивных и технологических параметров (расход и концентрация жидкости (газа), температура, давление и др.) оборудования, кото-

© Р.Н. Шамсутдинов, С.В. Павлов, А.Ю. Лещенко, 2019

рые могут повысить надежность и упростить конструкцию моделируемого объекта [5 – 7].

В отличие от других отраслей промышленности, отправной точкой для более активного использования CFD-кодов применительно к расчетным исследованиям и обоснованию безопасности технологий в атомной отрасли стало сообщение объединенного технического совещания Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ) и Агентства по ядерной энергии (АЯЭ), проходившего в Пизе (Италия) 11 – 14 ноября 2002 г. [8]. С этого времени МАГАТЭ ведет комплексную работу по продвижению использования CFD-моделирования в атомной энергетике, одним из направлений которой является верификация CFD-кодов [9 – 11]. Основная цель верификации – подтвердить адекватность расчетной модели и ее численной реализации путем сопоставления результатов моделирования с экспериментальными данными. Согласно последним тенденциям развития CFD-кодов в РФ, многие специалисты отмечают, что верификация CFD-кодов в объеме, необходимом для применения в атомной промышленности, еще не завершена [12]. Это, в первую очередь, связано с отсутствием необходимого набора экспериментальных данных для широкого круга задач вычислительной гидродинамики. В связи с этим подтверждение применимости CFD-кодов для проверки проектных решений при разработке оборудования в атомной энергетике является актуальной задачей.

При разработке конструкции ретортной садочной печи карботермического синтеза нитридов урана и плутония были определены требования к теплофизическим режимам ее работы, таким как скорость нагрева и охлаждения, температура загруженного в печь продукта, расход технологических газов, избыточное давление и другие. Для проверки реализуемости заданных теплофизических режимов работы ретортной садочной печи возникла необходимость в создании расчетной теплофизической модели. Для решения поставленной задачи был использован CFD-код SolidWorks Flow Simulation [13]. Цель работы – создание CFD-модели печи для расчета распределения температуры внутри ее реторты для заданных значений температуры нагревателей и расходов технологических газов, подаваемых в ретортное и заретортное пространство печи. В статье приведено описание CFD-модели, предназначенной для моделирования теплофизических режимов работы печи карботермического синтеза нитридов урана и плутония. Представлено сравнение полученных результатов расчета и экспериментальных данных по распределению температуры на загруженном в печь продукте в рабочем режиме эксплуатации.

ПЕЧЬ КАРБОТЕРМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА НИТРИДОВ УРАНА И ПЛУТОНИЯ

Ретортная садочная печь карботермического синтеза нитридов урана и плутония, 3D-модель которой показана на рис. 1, является составной частью цепочки оборудования модуля фабрикации (рефабрикации) (МФР) смешанного нитридного уран-плутониевого (СНУП) топлива, который входит в состав опытно-демонстрационного энергетического комплекса (ОДЭК).

Печь предназначена для получения нитридов урана и плутония путем карботермического восстановления углеродом в азотной и азотоводородной атмосфере диоксидов урана и плутония при температуре $1650 \pm 50^\circ\text{C}$. Описание конструкции ретортной садочной печи и технологического процесса карботермического синтеза приведены в [14]. Прессованные порошки диоксидов урана и плутония с углеродом, смешанные со связующим (стеарат цинка), размещают в пяти открытых прямоугольных емкостях (лодочках) внутри реторты печи. Печь оборудована трехсекционным нагревателем с индивидуальной регулировкой силы тока в каждой секции, что обеспечивает равномерный прогрев по всей длине реторты. Для упрощения и

повышения надежности конструкции печи температура загруженного продукта в процессе карботермического синтеза определяется косвенным методом – по температуре нагревателей.

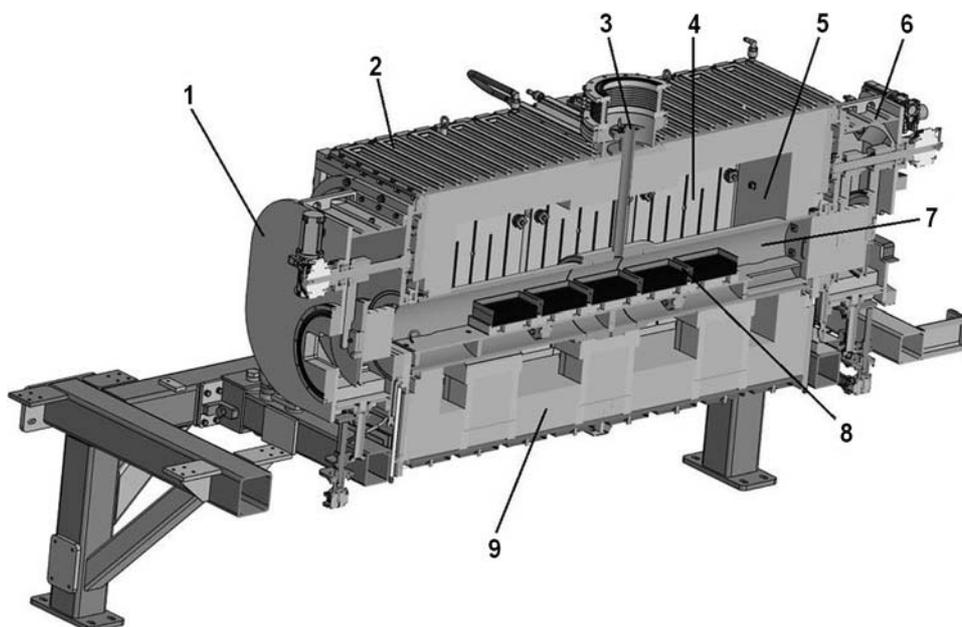


Рис. 1. 3D-модель печи карботермического синтеза: 1, 6 – входной, выходной шиберы; 2 – контур водяного охлаждения корпуса; 3 – трубопровод отвода печных газов; 4 – электронагреватели; 5 – корпус печи; 7 – реторта; 8 – лодочки с загруженным продуктом; 9 – футеровка

ФИЗИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И CFD-МОДЕЛЬ ПЕЧИ КАРБОТЕРМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА НИТРИДОВ УРАНА И ПЛУТОНИЯ

Физическая постановка задачи. В ретортную садочную печь высотой H , длиной L и шириной S подается азот с температурой $T_{аз}$ в ретортное и аргон с температурой $T_{ар}$ в заретортное пространство с расходами Q_p и Q_3 соответственно. В процессе передачи теплоты от нагревателей, размещенных в заретортном пространстве, с заданной температурой T_n происходит последовательно нагрев, изотермическая выдержка и охлаждение загруженных в лодочки имитаторов, которые размещены внутри реторты печи. В качестве теплоизоляции рабочего пространства печи используется футеровка толщиной $H_{ф}$, на внешней поверхности которой размещена система трубок водяного охлаждения с суммарным расходом $Q_в$. Основные допущения: жидкость и газы считаются сплошными однофазными ньютоновскими несжимаемыми средами, внутренние и внешние стенки проточных частей – гидравлически гладкими поверхностями. Требуется найти распределение температуры в объеме печи в нестационарном и стационарном режимах работы.

Для решения поставленной задачи был выбран программный комплекс SolidWorks Flow Simulation. Среди большого количества коммерческих программных продуктов для решения задач вычислительной гидродинамики SolidWorks Flow Simulation имеет ряд достоинств, среди которых можно выделить

- использование прямоугольной структурированной расчетной сетки [15];
- возможность моделирования сложной геометрии расчетных сборок;
- удобство использования и интуитивно понятный интерфейс.

Разработанная CFD-модель печи состоит из математической и сеточной модели.

Математическая модель. В качестве основных уравнений математической модели для описания движения и теплообмена в жидкости и газе в трехмерном случае в SolidWorks Flow Simulation используются уравнения Навье-Стокса, осредненные по Рейнольдсу. Законы сохранения массы, импульса и энергии для этих сред [13] имеют вид

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0;$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} + \frac{\partial P}{\partial x_i} = \frac{\partial(\tau_{ij} + \tau_{ij}^R)}{\partial x_j} + S_i;$$

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i H}{\partial x_i} = \frac{\partial(u_j(\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + q_i)}{\partial x_j} + \frac{\partial p}{\partial t} - \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \rho \varepsilon + S_i u_i + Q_H;$$

$$H = h + u^2/2,$$

где u – скорость среды; ρ – плотность среды; P – давление среды; S_i – внешние массовые силы, действующие на единичную массу текучей среды; H – полная энергия единичной массы текучей среды; Q_H – тепло, выделяемое источником в единичном объеме среды; τ_{ij} – тензор вязких сдвиговых напряжений; q_i – диффузионный тепловой поток.

Эти уравнения дополняются уравнением состояния газовой среды или жидкости и зависимостями плотности, вязкости, теплоемкости и коэффициента теплопроводности от температуры. Для определения турбулентной вязкости и кинетической энергии турбулентных пульсаций, которые входят в уравнение для тензора вязких сдвиговых напряжений, используется двухпараметрическая модель турбулентности k - ε [16].

Теплопередача в твердых телах моделируется с помощью уравнения

$$\frac{\partial \rho c T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda_i \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + Q_H,$$

где c – удельная теплоемкость; T – температура; λ – коэффициент теплопроводности; Q_H – удельное (в единице объема) тепловыделение источника тепла.

Теплообмен излучением моделируется в соответствии с законом Стефана-Больцмана:

$$Q_H = \varepsilon \sigma_0 (T_w^4 - T_s^4),$$

где ε – степень черноты поверхности; σ_0 – постоянная Стефана-Больцмана; T_w – температура поверхности, испускающей излучение; T_s – температура окружающей среды. Теплофизические свойства материалов печи, газовых сред и воды – плотность, теплоемкость, коэффициент теплопроводности, коэффициент черноты – задавались в зависимости от температуры согласно справочным данным [17]. Свойства материалов футеровки печи и нагревателей задавались по технической документации, предоставленной производителем.

При сопряженном теплообмене учитывается тепловой поток между твердым телом и жидкостью (газом), температура стенки твердого тела, характеристики пристеночного слоя и теплообмен излучением – при необходимости.

Для замыкания системы дифференциальных уравнений задаются начальные и граничные условия. В качестве начальных условий задавалась температура материалов печи, газовых сред и воды $T(x, y, z, 0) = 20^\circ\text{C}$; давление, скорость газовых сред и воды – $P(x, y, z, 0) = 101325$ Па и $V(x, y, z, 0) = 0$ м/с, где x, y, z – их координаты.

На поверхности нагревателей (рис. 2) задаются граничные условия первого рода $T(x_{nr}, y_{nr}, z_{nr}, t) = T_i = \text{const}$, где x_{nr}, y_{nr}, z_{nr} – координаты поверхности нагревателей, T_i – значения температуры нагревателей в каждый момент времени i . На поверхностях патрубков подачи газа в ретортное и заретортное пространства, патрубков водяного охлаждения задаются граничные условия первого рода $V(x_{br}, y_{br}, z_{br}, t) = \text{const}$ и $T(x_{br}, y_{br}, z_{br}, t) = \text{const}$, где x_{br}, y_{br}, z_{br} – координаты поверхности подачи газов и водяного охлаждения. На выходе патрубков подачи газа в ретортное и заретортное пространства, патрубков водяного охлаждения задаются граничные условия второго рода

$$\partial V(x_{вых}, y_{вых}, z_{вых}, t) / \partial n = 0,$$

$$\partial T(x_{вых}, y_{вых}, z_{вых}, t) / \partial n = 0,$$

$$\partial P(x_{вых}, y_{вых}, z_{вых}, t) / \partial n = 0,$$

где n – вектор нормали к границе; $x_{вых}, y_{вых}, z_{вых}$ – координаты выходных патрубков. На границах расчетной области (см. рис. 2) за исключением границы, образованной плоскостью симметрии, которая перпендикулярна к продольной оси реторты печи, задаются граничные условия первого рода для давления $P(x_{gr}, y_{gr}, z_{gr}, t) = 101325$ Па, температуры $T(x_{gr}, y_{gr}, z_{gr}, t) = 20^\circ\text{C}$ и скорости движения воздуха $V(x_{gr}, y_{gr}, z_{gr}, t) = 0$ м/с, где x_{gr}, y_{gr}, z_{gr} – координаты границ расчетной области; t – время. Граница симметрии означает равенство нулю нормальной к границе составляющей скорости движения газов, а также градиентов всех остальных величин (Φ – температура, давление):

$$V(x_c, y_c, z_c, t) = 0 \text{ м/с}, \quad \partial \Phi / \partial n = 0,$$

где n – вектор нормали к границе симметрии; x_c, y_c, z_c – координаты границы симметрии.

Для дискретизации полученной системы дифференциальных уравнений в SolidWorks Flow Simulation используется метод конечных объемов. Объект исследования представляется в виде сеточной модели, ячейки которой имеют форму параллелепипедов (значения независимых переменных рассчитываются в центрах ячеек, а на гранях этих ячеек рассчитываются потоки массы, импульса, энергии). Для каждой ячейки записываются линеаризованные уравнения, описывающие законы сохранения исследуемой скалярной физической величины. Пространственные производные аппроксимируются с помощью неявных разностных операторов второго порядка точности (модифицированная неявная QUICK-аппроксимация Леонарда [18] и метод минимизации полной вариации TVD [19]). При дискретизации по времени (метод типа SIMPLE [20]) для каждой ячейки сетки из условия Куранта определяется допустимый максимальный шаг по времени, зависящий как от значений физических величин, так и от шага дискретизации по пространству в этой ячейке. Для решения системы полностью неявных линейных дискретных уравнений используется обобщенный метод сопряженных градиентов [21] с привлечением метода неполной LU-факторизации [13]. Сходимость решения оценивалась по характеру изменения значений целевых параметров (температуры на поверхности загруженного продукта, баланса расходов азота в ретортном и заретортном пространствах, охлаждающей воды) при фиксированном шаге по времени. Целевой параметр считается сошедшимся, если рассчитанное значение размаха амплитуды колебаний целевого параметра (дельта) становится меньше установленного критерия сходимости (для температуры 1°C , для значений расхода азота и охлаждающей воды $0,000001$ кг/ч).

Сеточная модель. Для экономии вычислительных ресурсов в качестве расчетной области для построения сеточной модели была взята половина печи (см. рис. 2). Рас-

четная область представляет собой симметричный относительно центральной плоскости параллелепипед (проходит через центральную лодочку). Плоскость симметрии перпендикулярна к продольной оси реторты печи.

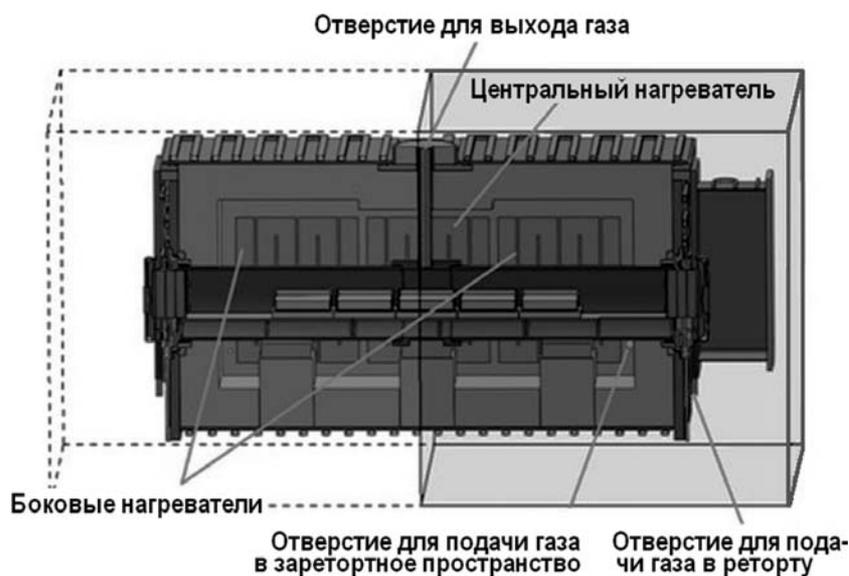


Рис. 2. Расчетная область CFD-модели печи

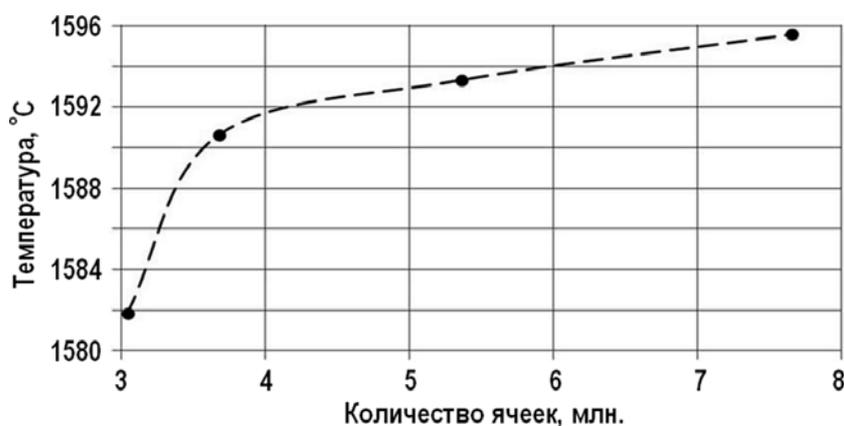


Рис. 3. Исследование сеточной сходимости

Были выполнены исследования сеточной сходимости для оценки зависимости расчетных значений температуры в локальных областях печи от характерных размеров сеточной модели. На рисунке 3 представлена зависимость расчетной установившейся температуры на поверхности загруженного продукта в крайней лодочке от размерности расчетной сетки. По результатам исследования сеточной сходимости была выбрана расчетная сетка с размерностью 7,65 млн. ячеек. Это обусловлено тем, что относительное отклонение температуры на поверхности загруженного продукта для размерности сетки 5,36 млн. от 3,68 млн. составляет 0,17%, а для 7,65 млн. от 5,36 млн. – 0,14%. В абсолютных значениях температуры эти отклонения составляют 2,7 и 2,3°C. Дальнейшее дробление и увеличение размерности сетки приведет к уменьшению этого отклонения. К примеру значение экспериментальной погрешности для этого диапазона температур $\pm 8^\circ\text{C}$. Таким образом, увеличение размерности сетки является нецелесообразным, в том числе и по причине экономии вычислительных ресурсов.

Для разрешения относительно небольших геометрических особенностей сеточной модели используется локальное дробление ячеек сетки в области контакта твердого тела и текучей среды. Аналогично разрешаются области с градиентами температуры в твердых телах расчетной модели (лодочки с загруженным продуктом, реторта, трубки подачи азота и др.).

РЕЗУЛЬТАТЫ ВЕРИФИКАЦИИ CFD-МОДЕЛИ ПЕЧИ

Для проверки адекватности разработанной CFD-модели печи были использованы результаты температурных испытаний ретортной садочной печи карботермического синтеза нитридов урана и плутония. Цель экспериментальных исследований – оценка распределения температуры на загруженном продукте в лодочках при различных температурных режимах работы печи (нагрев, выдержка и охлаждение).

Внутри реторты печи были размещены пять лодочек из вольфрама, в которые вместо прессованных порошков диоксидов урана и плутония с углеродом были загружены имитаторы (силикатный кирпич) с похожими теплофизическими свойствами. Для экспериментальных исследований был выбран режим работы, близкий к режиму промышленной эксплуатации печи. В ходе исследований регистрировались значения температуры на нагревателях и на загруженном продукте, значения расходов азота, подаваемого в реторту и заретортное пространство, расход воды в контуре водяного охлаждения корпуса печи. Измерения температуры загруженного продукта выполнялись с помощью трех контрольных вольфрам-рениевых термопар с погрешностью измерения температуры $\pm 5^\circ\text{C}$ в диапазоне от 0 до 1000°C и $\pm 0,005 \cdot t$ для диапазона от 1000 до 1950°C (t – измеренное значение температуры). Рабочие концы двух термопар (горячие спаи) размещались внутри крайних лодочек (№ 1 и № 5) на поверхности загруженного продукта на расстоянии ~ 15 мм от наружной стенки лодочки – зона 1 и зона 3 соответственно (рис. 4). Третья термопара помещалась в центре лодочки №3 на поверхности загруженного продукта – зона 2.



Рис. 4. Размещение лодочек № 1 – 5 внутри реторты печи

По результатам проведенных экспериментальных и расчетных исследований были получены зависимости температуры загруженного продукта в лодочках печи в местах размещения термопар от времени (рис. 5, 6). Зарегистрированные в ходе эксперимента значения температуры загруженного продукта в крайних лодочках № 1 и № 5 отличаются незначительно, что свидетельствует о симметричности полученного температурного профиля (см. рис. 5).

На рисунках 5, 6 можно видеть хорошее совпадение расчетных и экспериментальных значений температуры загруженного продукта в крайней и центральной лодочках как в процессе изотермической выдержки, так и во время нагрева и охлажде-

ния. При этом наблюдается большее отклонение расчетных и экспериментальных значений температуры при нагреве и охлаждении загруженного продукта в крайних лодочках по сравнению с центральной.

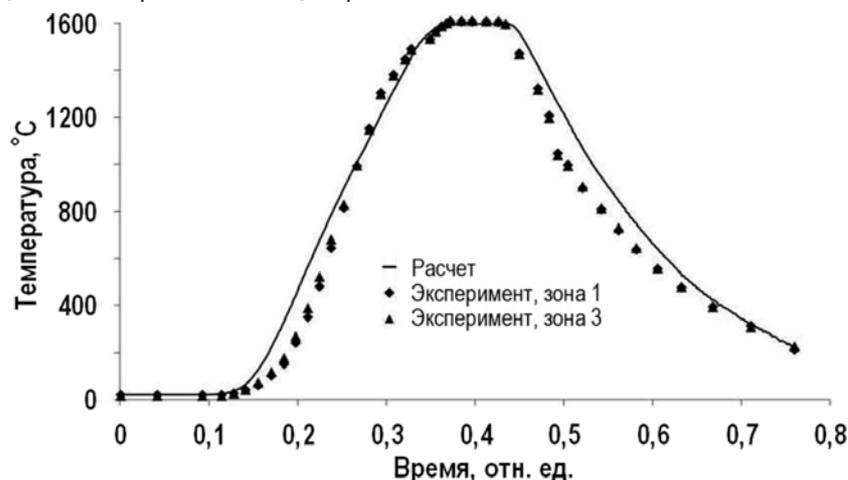


Рис. 5. Температура загруженного продукта в крайних лодочках внутри реторты (зоны 1, 3)

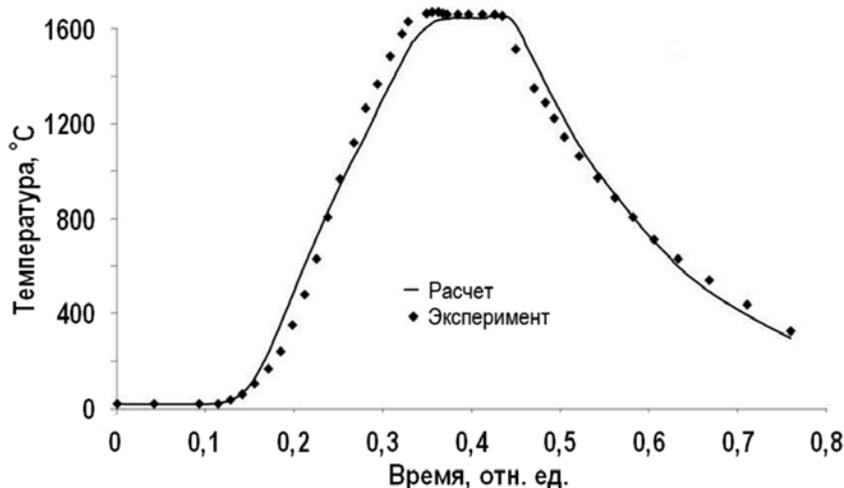


Рис. 6. Температура загруженного продукта в центральной лодочке внутри реторты (зона 2)

Максимальное относительное отклонение расчетной средней скорости нагрева загруженного продукта в центральной и крайних лодочках от экспериментальной в промежутки времени 0,15 – 0,33 отн. ед. составляет 7,6 и 3,6% соответственно.

Максимальное относительное отклонение расчетной средней скорости охлаждения загруженного продукта в центральной и крайних лодочках от экспериментальной после момента времени 0,45 отн. ед. составляет 10 и 6% соответственно.

На рисунке 7 показан фрагмент экрана монитора с расчетными и экспериментальными значениями температуры на поверхности загруженного продукта в лодочках в процессе изотермической выдержки (в стационарном режиме). Относительное отклонение расчетных значений температуры от экспериментальных составляет

- в крайних лодочках 0,7%;
- в центральной лодочке 0,1%.

Полученные значения относительного отклонения расчетных и экспериментальных результатов свидетельствуют о достаточно высокой точности расчетов, выполненных с помощью CFD-модели печи.

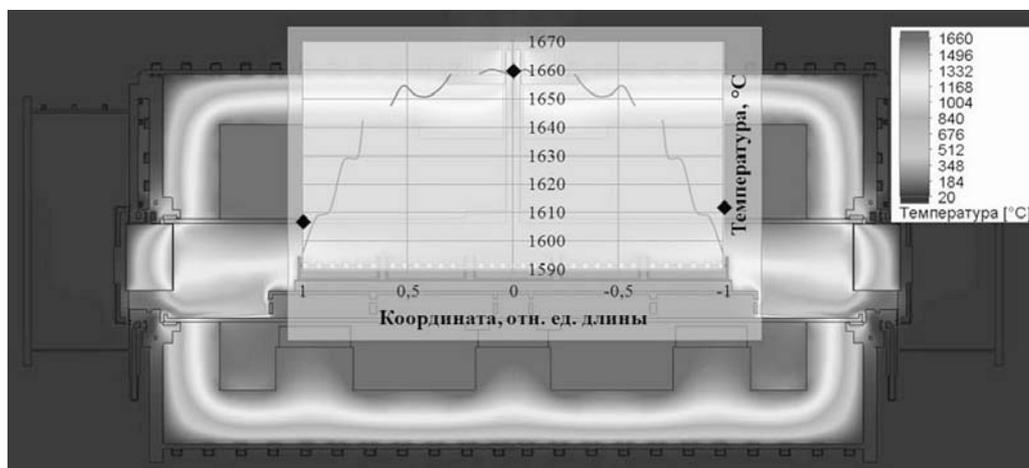


Рис. 7. Профиль температуры на поверхности загруженного продукта в процессе изотермической выдержки: — – расчет; ◆ – эксперимент (скриншот)

ВЫВОДЫ

1. Разработана CFD-модель печи карботермического синтеза нитридов урана и плутония в программном комплексе SolidWorks Flow Simulation, которая позволяет моделировать теплофизические режимы работы печи (нагрев, выдержка, охлаждение загруженного продукта) без учета физико-химических превращений, протекающих в процессе карботермического синтеза загруженного топлива.

2. Выполнена верификация разработанной CFD-модели печи и подтверждена ее адекватность на основании экспериментальных данных температурных испытаний печи карботермического синтеза нитридов урана и плутония. Относительное отклонение расчетных значений температуры загруженного продукта в крайних и центральной лодочках печи от экспериментальных значений в процессе изотермической выдержки составляет 0,7 и 0,1% соответственно. Расчетные оценки значений температуры загруженного продукта, полученные с помощью созданной CFD-модели печи, были использованы для обоснования принятых конструкторских решений печи карботермического синтеза нитридов урана и плутония. Эти результаты также могут быть использованы для моделирования кинетики реакции карботермического синтеза СНУП-топлива в токе азота (азотородородной смеси) в этой печи.

3. Созданная CFD-модель печи карботермического синтеза нитридов урана и плутония может быть использована для выбора режима эксплуатации печи путем подбора значений расхода технологических газов, подаваемых в ретортное и заретортное пространства печи, температуры нагревателей, скорости нагрева и охлаждения загруженного продукта. CFD-модель была использована в ходе разработки и обоснования работоспособности конструкции промышленной печи. Результаты, полученные с помощью CFD-модели, входят в состав рабочей конструкторской документации (РКД) и технические отчеты по данной печи.

Литература

1. Spalart P.R., Venkatakrishnan V. On the role and challenges of CFD in the aerospace industry. // The Aeronautical Journal. – 2016. – Vol. 120. – No. 1223. – PP. 209-232.
2. Raynal L., Augier F., Bazer-Bachi F., Haroun Y., Pereira da Fonte C. CFD applied to process development in the oil and gas industry. // Oil&Gas Science and Technology. – 2016. – Vol.

71. – No 3. – PP. 1-24.
3. *Mizzi K., Kellett P., Demirel Y.K., Martin R., Turan O.* HPC and CFD in the marine industry: past, present and future. / Proc. of the IIIrd Intern. Conf. on Exascale Applications and Software. – Edinburgh, 2015. – PP. 92–97.
4. *Joshi J., Nayak A.* Advances of computational fluid dynamics in nuclear reactor design and safety assessment. – Duxford, United Kingdom: Woodhead Publ., 2019. – 888 p.
5. *Besagni G., Mereu R., Inzoli F.* CFD study of ejector flow behavior in a blast furnace gas galvanizing plant. // Journal of Thermal Science. – 2015. – Vol. 24. – No. 1. – PP. 58–66.
6. *Wang X., Li Y.* A comprehensive 3D mathematical model of the electroslag remelting process. / Metallurgical and Materials Transactions B. – 2015. – Vol. 46. – No. 4. – PP. 1837-1849.
7. *Thompson JS., Walton S., Hassan S., Rolland SA., Sienz J.* The use of CFD and multi-objective optimization techniques to customise an industrial pre-mixer. // Structural and Multidisciplinary Optimization. – 2017. – Vol. 55. – No. 6. – PP. 2339-2351.
8. IAEA-TECDOC-1379. Use of computational fluid dynamics codes for safety analysis of nuclear reactor systems. – 2002. – PP. 1-50.
9. *Mahaffy J.* Best Practice Guidelines for the Use of CFD in Nuclear Reactor Safety Applications. – NEA-CSNI-R-2014-11, Nuclear Energy Agency of the OECD (NEA), 2015.
10. *Smith B.L.* Assessment of CFD Codes for Nuclear Reactor Safety Problems. – NEA-CSNI-R-2014-12, Nuclear Energy Agency of the OECD (NEA), 2015.
11. *Bestion D.* Extension of CFD Codes Application to Two-Phase Flow Safety Problems – NEA-CSNI-R-2014-13, Nuclear Energy Agency of the OECD (NEA), 2014.
12. *Быков М.А., Курносов М.М.* Работы АО ОКБ «Гидропресс» по реализации инвестиционного проекта НИОКР «Внедрение CFD-методов для поддержки проектирования и обоснования проектов». Задачи, состав и ход выполнения. / Сб. тез. научно-техн. семинара «Проблема верификации и применения CFD-кодов в атомной энергетике». – Нижний Новгород: ОАО «ОКБМ Африкантов», 2018. – С. 5-16.
13. *Алямовский А.А., Собачкин А.А., Одинцов Е.В., Харитонович А.И., Пономарев Н.Б.* SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 800 с.
14. *Смирнов В.П., Павлов С.В., Иванов Д.В., Шамсутдинов Р.Н., Инютин Н.В., Сидоренко Д.М., Солопеко А.В., Сайфутдинов С.Ю., Давыдов А.В., Чамовских Ю.В., Сергеев Н.Г., Зозуля Д.В.* Установка карботермического синтеза нитридов для производства смешанного нитридного уран-плутониевого топлива. // Атомная энергия. – 2018. – Т. 125. – Вып. 5. – С. 284-287.
15. *Sobachkin A., Dumnov G.* Numerical Basis of CAD-Embedded CFD. – Dassault Systems, 2014. – PP. 1-19.
16. *Wilcox D.C.* Turbulence Modeling for CFD. – La Canada, California: DCW Industries, Inc. – 1998. – 460 p.
17. *Чиркин В. С.* Теплофизические свойства материалов ядерной техники. – М.: Атомиздат, 1968. – 485 с.
18. *Roache P.J.* Fundamentals of computational fluid dynamics. – Albuquerque, New Mexico: Hermosa Publ., 1998. – 648 p.
19. *Hirsch C.* Numerical computation of internal and external flows. Vol. 1. – Chichester: John Wiley&Sons Ltd, 1991. – 538 p.
20. *Patankar S.V.* Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. – Washington: Hemisphere, 1980. – 197 p.
21. *Saad Y.* Iterative Methods for Sparse Linear Systems. – Boston: PWS Publ., 1996. – 184 p.

Поступила в редакцию 18.07.2019 г.

Авторы

Шамсутдинов Ринат Нурисламович, инженер, аспирант
E-mail: srn@sosny.ru

Павлов Сергей Владленович, советник директора, доктор техн. наук
E-mail: pavlov@sosny.ru

Лещенко Антон Юрьевич, главный специалист, канд. техн. наук
E-mail: lay@sosny.ru

DEVELOPMENT AND VERIFICATION OF CFD MODEL OF FURNACE FOR CARBOTHERMAL SYNTHESIS OF MIXED NITRIDE URANIUM-PLUTONIUM FUEL

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

* Sosny R&D Company

4 a Dimitrov Ave, Dimitrovgrad, Ulyanovsk reg., 433507 Russia

** DETI MEFhI

294 Kuibyshev Ave, Dimitrovgrad, Ulyanovsk reg., 433511 Russia

ABSTRACT

The retort furnace for the carbothermal synthesis of mixed nitride uranium-plutonium (MNUP) fuel makes part of the Fabrication/Refabrication Module (FRM) at the Pilot Demonstration Energy Complex (PDEC). A CFD model of the furnace was developed with the SolidWorks Flow Simulation software to check the feasibility of thermophysical operating modes (heating and cooling rates, temperature of the product loaded into the furnace). The experimental data obtained from the furnace performance tests with the dummy fuel were used to verify the CFD model developed and to confirm its adequacy. The relative deviation of the calculated dummy fuel temperature from the experimental data in the process of isothermal annealing does not exceed 0.7%.

The dummy fuel temperature values obtained with the CFD model were used to justify the engineering solutions adopted for the MNUP carbothermal synthesis furnace. The CFD model can be used to define the furnace operation mode by selecting gas flow rates inside and outside the furnace retort, as well as the heaters temperature and the product heating and cooling rates.

Key words: CFD model, MNUP fuel, SolidWorks Flow Simulation, furnace, carbothermal synthesis, mathematical model, grid model.

REFERENCES

1. Spalart P.R., Venkatakrishnan V. On the role and challenges of CFD in the aerospace industry. *The Aeronautical Journal*, 2016, v. 120, iss. 1223, pp. 209-232.
2. Raynal L., Augier F., Bazer-Bachi F., Haroun Y., Pereira da Fonte C. CFD applied to process development in the oil and gas industry. *Oil&Gas Science and Technology*, 2016, v. 71, iss. 3, pp. 1-24.
3. Mizzi K., Kellett P., Demirel Y.K., Martin R., Turan O. HPC and CFD in the marine industry: past, present and future. *Proc. of the IIIrd Intern. Conf. on Exascale Applications and Software*. Edinburgh, 2015, pp. 92-97.
4. Joshi J., Nayak A. *Advances of Computational Fluid Dynamics in Nuclear Reactor Design and Safety Assessment*. Duxford, United Kingdom: Woodhead Publ., 888 p.
5. Besagni G., Mereu R., Inzoli F. CFD study of ejector flow behavior in a blast furnace gas galvanizing plant. *Journal of Thermal Science*, 2015, v. 24, iss. 1, pp. 58-66.
6. Wang X., Li Y. A comprehensive 3D mathematical model of the electroslag remelting process. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2015, v. 46, iss. 4, pp. 1837-1849.
7. Thompson J.S., Walton S., Hassan S., Rolland S.A., Sienz J. The use of CFD and multi-objective optimization techniques to customise an industrial pre-mixer. *Structural and Multisiciplinary Optimization*, 2017, v. 55, iss. 6, pp. 2339-2351.
8. IAEA-TECDOC-1379 *Use of computational fluid dynamics codes for safety analysis of nuclear reactor systems*. 2002, pp. 1-50.

9. Mahaffy J. *Best Practice Guidelines for the Use of CFD in Nuclear Reactor Safety Applications*. NEA-CSNI-R-2014-11, Nuclear Energy Agency of the OECD (NEA), 2015.
10. Smith B.L. *Assessment of CFD Codes for Nuclear Reactor Safety Problems*. NEA-CSNI-R-2014-12, Nuclear Energy Agency of the OECD (NEA), 2015.
11. Bestion D. *Extension of CFD Codes Application to Two-Phase Flow Safety Problems* NEA-CSNI-R-2014-13, Nuclear Energy Agency of the OECD (NEA), 2014.
12. Bykov M.A., Kurnosov M.M. *Raboty AO OKB «Gidropress» po realizacii investicionnogo proekta NIOKR «Vnedrenie CFD metodov dlja podderzhki proektirovanija i obosnova-nija proektov». Zadachi, sostav i hod vypolnenija*. Sbornik tezisov nauchno-tehnicheskogo seminaru «Problema verifikacii i primenenija CFD kodov v atomnoj jenergetike». Nizhnij Novgorod. OAO «OKBM Afrikantova» Publ., 2018, pp. 5-16 (in Russian).
13. Aljamovskij A.A., Sobachkin A.A., Odincov E.V., Haritonovich A.I., Ponomarev N.B. *SolidWorks. Komp'juternoe modelirovanie v inzhenernoj praktike*. SPb.: BHV-Petersburg, 2005, 800 p. (in Russian).
14. Smirnov V.P., Pavlov S.V., Ivanov D.V., Shamsutdinov R.N., Inyutin N.V., Sidorenko D.M., Solopeko A.V., Sajfutdinov S.Yu., Davydov A.V., Chamovskih Yu.V., Sergeev N.G., Zozulya D.V. *Carbothermal Facility for the Synthesis of Nitrides for Mixed Uranium-Plutonium Fuel Production*. *Atomnaya Energiya*, 2019, v. 125, iss. 5, pp. 322-325 (in Russian).
15. Sobachkin A., Dumnov G. *Numerical Basis of CAD-Embedded CFD*. Dassault systems, 2014, pp. 1-19.
16. Wilcox D.C. *Turbulence Modeling for CFD*. La Canada, California: DCW Publ., 1998, P.460.
17. Chirkin V.S. *Teplofizicheskie svojstva materialov jadernoj tehniki*. Moscow. Atomizdat Publ., 1968, 485 p. (in Russian).
18. Roache P.J. *Fundamentals of Computational Fluid Dynamics*. Albuquerque, New Mexico. Hermosa Publ., 1998, 648 p.
19. Hirsch C. *Numerical Computation of Internal and External Flows. Vol. 1*. Chichester. John Wiley&Sons Ltd, 1991, 538 p.
20. Patankar S.V. *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. Washington. Hemisphere, 1980, 197 p.
21. Saad Y. *Iterative Methods for Sparse Linear Systems*. Boston. PWS Publ., 1996, 184 p.

Authors

Shamsutdinov Rinat Nurislamovich, Engineer, PhD Student

E-mail: srn@sosny.ru

Pavlov Sergey Vladlenovich, Advisor to Director, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: pavlov@sosny.ru

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

E-mail: lay@sosny.ru