

CFD-МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПЕЧИ КАРБОТЕРМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА НИТРИДОВ УРАНА И ПЛУТОНИЯ

© 2021 г. Р. Н. Шамсутдинов^{1,2,*}, С. В. Павлов^{1,2}, А. Ю. Лещенко¹, М. И. Ильяшик³,
М. К. Горбачев³

¹ ООО НПФ “Сосны”, Димитровград, 433507, Россия

² Димитровградский инженерно-технологический институт –
филиал Национального исследовательского ядерного университета “МИФИ”, Димитровград, 433507, Россия

³ АО “Прорыв”, Москва, 107140, Россия

*e-mail: srn@sosny.ru

Поступила в редакцию 29.03.2021 г.

После доработки 05.04.2021 г.

Принята к публикации 13.04.2021 г.

Приведены результаты численных исследований влияния параметров печи карботермического синтеза нитридов урана и плутония (температура нагревателей, расход и температура газа) на температурное поле, характер движения и скорость потоков газа в ее зоне реакции. Для проведения численных исследований была использована ранее разработанная CFD-модель и верифицированная для переходных режимов работы и режима изотермической выдержки печи. В CFD-модели печи учтены две особенности, которые связаны с реакцией карботермического синтеза нитридов урана и плутония – изменение теплофизических свойств продукта внутри печи при переходе UO_2 и PuO_2 в $(U, Pu)N$ и выделение тепла при протекании экзотермической реакции карботермического синтеза. Показано, что существует достаточно широкий диапазон параметров печи, которые позволяют гарантированно обеспечивать температуру всего объема продукта в границах диапазона $1650 \pm 50^\circ C$ для протекания реакции карботермического синтеза нитридов урана и плутония. Установлено, что максимальное значение неравномерности температуры по объему продукта не превышает $65^\circ C$. Анализ характера движения газовых потоков внутри реторты свидетельствует о том, что обеспечивается доставка азота и азотоводородной смеси в зону реакции всего объема продукта, а также отвод газовых продуктов реакции из реторты. Учитывая то, что расход и температура газа не оказывают существенного влияния на температуру продукта внутри реторты – их выбор следует производить с учетом оптимального протекания химической реакции карботермического синтеза нитридов урана и плутония. Результаты исследований наглядно демонстрируют возможности CFD моделирования теплофизических процессов в высокотемпературной ретортной печи как на стадии разработки оборудования, так и на стадиях выбора и обоснования технологических режимов ее эксплуатации.

Ключевые слова: CFD, нитрид урана, нитрид плутония, печь, карботермический синтез, численные исследования

DOI: 10.1134/S2304487X21020103

ВВЕДЕНИЕ

Одним из актуальных направлений развития современной атомной энергетики в Российской Федерации (РФ) является переход на технологии быстрых реакторов (БР) и замыкание ядерного топливного цикла (ЗЯТЦ) [1–3]. В качестве перспективного ядерного топлива для БР рассматривается смешанное нитридное уран-плутониевое (СНУП) топливо [4, 5]. Для фабрикация СНУП топлива в РФ создано уникальное печное оборудование [6]. Для научно-технического сопровождения при разработке конструкции и обоснования выбранных эксплуатационных параметров

данного оборудования были успешно использованы методы вычислительной гидродинамики (CFD) [7]. В частности, была разработана и выполнена верификация CFD-модели печи для получения нитридов урана и плутония путем карботермического восстановления углеродом в азотной и азотоводородной атмосфере диоксидов урана и плутония [8]. Описание печи и процесса карботермического синтеза приведены в [7]. Для верификации CFD-модели печи использовали результаты экспериментальных исследований с имитаторами ядерного топлива.

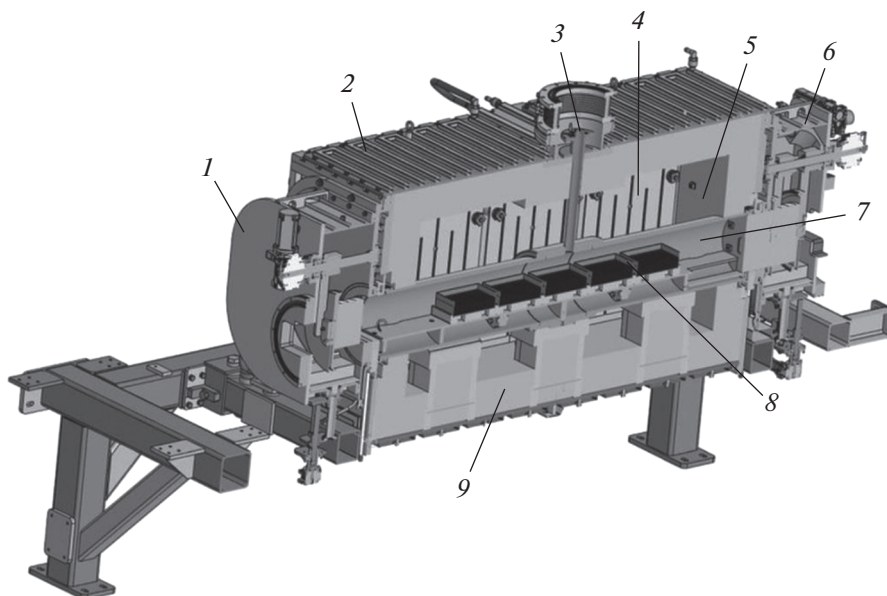


Рис. 1. 3D-модель печи карботермического синтеза нитридов: 1, 6 – входной, выходной шиберы; 2 – контур водяного охлаждения корпуса; 3 – трубопровод отвода печных газов; 4 – электронагреватели; 5 – корпус печи; 7 – реторта; 8 – лодочки с загруженным продуктом; 9 – футеровка.

Разработанная CFD-модель позволяет проводить численное моделирование работы печи карботермического синтеза нитридов урана и плутония в зависимости от входных параметров: температуры на нагревателях, расхода и температуры газа, подаваемого в зону реакции карботермического синтеза. В частности, модель позволяет получить:

- пространственное распределение температуры как внутри печи, так и в объеме загруженного в печь продукта;
- характерные картины движения и распределения скорости газа в объеме печи.

То есть позволяет моделировать те процессы, которые определяют протекание реакции карботермического синтеза.

В CFD-модели печи учтены две особенности, которые связаны с реакцией карботермического синтеза нитридов урана и плутония – изменение теплофизических свойств продукта внутри печи при переходе UO_2 и PuO_2 в $(\text{U}, \text{Pu})\text{N}$ и выделение тепла при протекании экзотермической реакции карботермического синтеза.

В данной статье приведены результаты численных исследований влияния параметров CFD-модели печи карботермического синтеза нитридов (температура нагревателей, расход и температура газа) на температурное поле, характер движения и скорость потоков газа внутри печи. Результаты исследований наглядно демонстрируют возможности CFD-моделирования теплофизических процессов в высокотемпературной реторт-

ной печи как на стадии разработки оборудования, так и на стадиях выбора и обоснования технологических режимов ее эксплуатации.

ПЕЧЬ КАРБОТЕРМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА НИТРИДОВ УРАНА И ПЛУТОНИЯ И CFD-МОДЕЛЬ ПЕЧИ

3D-модель ретортной садочной печи карботермического синтеза нитридов урана и плутония представлена на рис. 1 [8].

Печь предназначена для получения нитридов урана и плутония путем карботермического восстановления углеродом в азотной и азотоводородной атмосфере диоксидов урана и плутония при температуре $1650 \pm 50^\circ\text{C}$.

Печь оборудована трехсекционным нагревателем, секции которого попарно расположены по обе стороны от реторты, в которой размещаются пять прямоугольных емкостей (лодочки) с продуктом. Загружаемый в печь продукт представляет собой прессованные шашки из порошков диоксида урана и плутония с углеродом, смешанные со связующим веществом. Описание печи и процесса карботермического синтеза приведены в [7].

3D CFD-модель печи реализована в программном комплексе SolidWorks Flow Simulation [9, 10]. Подробное описание CFD-модели приведено в [8]. Для расчета течения и теплообмена в SolidWorks Flow Simulation используются уравнения Навье–Стокса и законы сохранения массы, импульса и энергии. Двухпараметрическая k - ϵ модель турбулентности используется для модели-

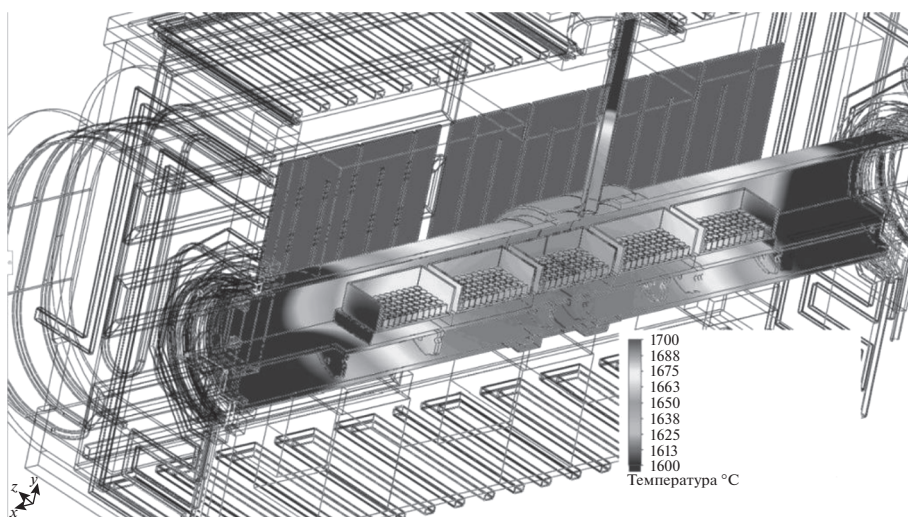


Рис. 2. Распределение температуры на поверхностях нагревателей и реторте печи с загруженным продуктом в процессе изотермической выдержки.

рования турбулентных и ламинарных течений [11, 12]. Расчетная область модели представляет собой симметричный относительно центральной плоскости параллелепипед (плоскость симметрии перпендикулярна к продольной оси реторты). По результатам исследования сеточной сходимости была выбрана расчетная сетка с размерностью 3.8 млн ячеек.

Выполнена верификация разработанной CFD-модели печи и подтверждена ее адекватность на основе экспериментальных данных температурных испытаний печи карботермического синтеза нитридов урана и плутония как в режиме изотермической выдержки, так и в переходных режимах ее работы. Относительное отклонение расчетных значений температуры загруженного имитатора ядерного топлива в крайних и центральной лодочках печи от экспериментальных значений в процессе изотермической выдержки составляет 0.7 и 0.1%, соответственно [8].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ЧИСЛЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ CFD-МОДЕЛИ

При верификации CFD-модели печи было установлено, что в процессе изотермической выдержки загруженного в печь продукта на нем наблюдается неравномерное распределение температуры (рис. 2). Причиной этого является неравномерность распределения температуры на реторте, по торцам которой осуществляется сток тепла.

В связи с этим задача численных исследований CFD-модели печи — изучить влияние параметров печи (температура нагревателей, расход и температура газа, подаваемого в реторту) на температуру загруженного в печь продукта в процессе его

изотермической выдержки. Диапазон изменения параметров печи в расчетных исследованиях:

- температура нагревателей — от 1670 до 1720°C (шаг изменения параметра 10°C);
- расход газа — от 0 до 7 м³/ч (шаг изменения параметра 1 м³/ч);
- температура газа — от 20 до 600°C (значения 20, 100, 300 и 600°C).

Для решения поставленной задачи были рассмотрены следующие расчетные случаи:

- 1) изучить влияние изменения температуры нагревателей для каждого фиксированного значения расхода газа, подаваемого в реторту печи, на распределение температуры на продукте;
- 2) изучить влияние изменения температуры газа, подаваемого в реторту печи, при фиксированном значении расхода на входе в нее и температуры нагревателей печи на распределение температуры на продукте;
- 3) изучить влияние изменения значения расхода, подаваемого в реторту печи, при фиксированных значениях температуры нагревателей и газа на распределение температуры на продукте и распределение скорости газа в печи.

Исследуемые параметры CFD-модели печи включают в себя распределение температуры по длине, высоте (глубине), ширине (поперечном направлении, перпендикулярном продольной оси реторты) продукта, представленное на рис. 3.

На рис. 3 с результатами распределения температуры по ширине 0 отн. ед. соответствует геометрическому центру продукта в лодочке. Также на рис. 3 с результатами распределения температуры по длине продукта координаты 0—0.17 отн. ед. — в центральной лодочке, 0.25—0.58 отн. ед. — в ло-

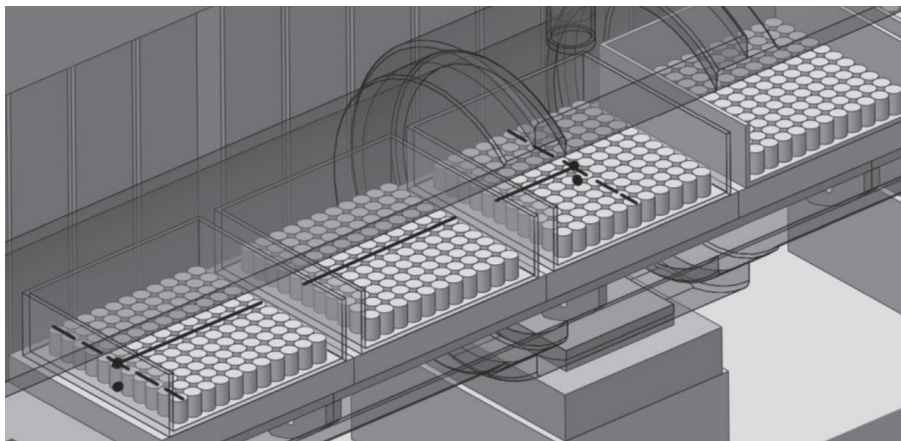


Рис. 3. Расположение точек измерения температуры на продукте: ■ — по длине, — — — по ширине, • — по высоте.

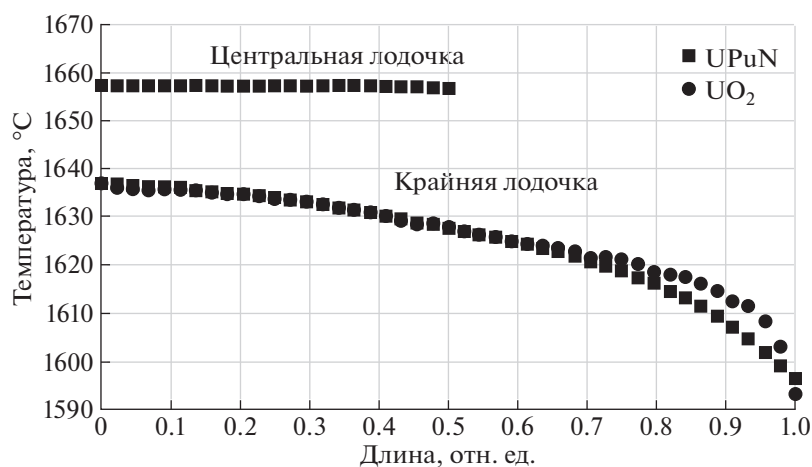


Рис. 4. Распределение температуры на поверхности продукта по его длине (вдоль продольной оси реторты).

дочке между крайней и центральной, 0.67–1.00 отн. ед. — в крайней лодочке.

Для демонстрации возможностей CFD-моделирования и проведения численных исследований загружаемый в печь продукт задавался в виде равномерно сложенных в лодочки в несколько рядов и слоев шашек. При необходимости для исследовательских целей в CFD-модели печи также может быть задано произвольное расположение шашек в лодочках (например, навалом).

ВЛИЯНИЕ РЕАКЦИИ КАРБОТЕРМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА НА ТЕМПЕРАТУРУ ПРОДУКТА

В качестве теплофизических свойств продукта задавались свойства (U, Pu)N, так как при изменении теплофизических свойств продукта с UO₂ (исходный продукт) на (U, Pu)N (готовый продукт) температура на его поверхности в процессе

его изотермической выдержки ($1650 \pm 50^\circ\text{C}$) практически не изменяется (рис. 4). Максимальное относительное отклонение температуры по высоте продукта для (U, Pu)N от UO₂ не превышает 0.4%. Таким образом, распределение температуры на продукте будет отличаться незначительно независимо от того, какие теплофизические свойства у него назначены — (U, Pu)N или UO₂.

Для оценки выделяемого количества теплоты в процессе карботермического синтеза и задания зависимости мощности тепловыделения продукта от времени в CFD-модели печи было использовано значение константы скорости реакции $1.77 \cdot 10^{-4} \text{ c}^{-1}$ [13]. Энтальпия образования продукта принималась равной -294.55 кДж/моль . Учитывая то, что рассматриваемая CFD-модель печи симметрична относительно центральной плоскости, которая перпендикулярна продольной оси реторты, то для половины загруженного продук-

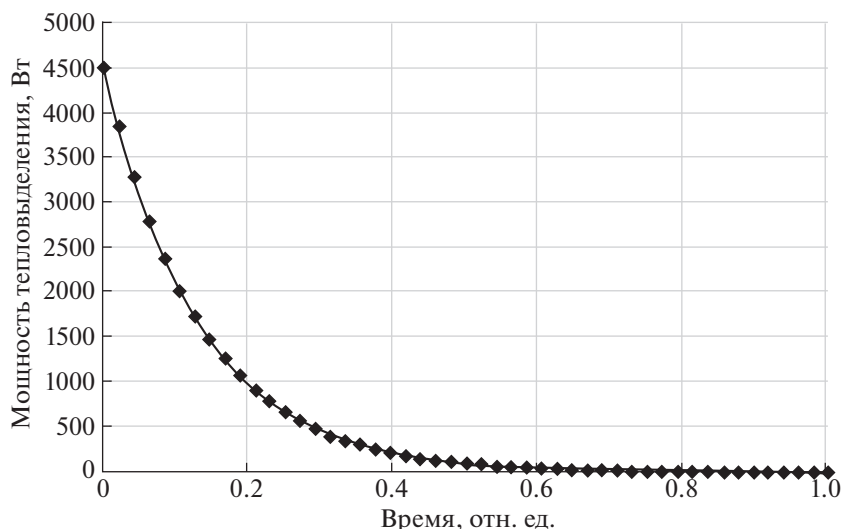


Рис. 5. Зависимость тепловыделения половины объема продукта от времени.

та, объем которого извлечен из CAD-геометрии созданной CFD-модели получаем следующую зависимость для его тепловыделения от времени, которая представлена на рис. 5. Зависимость для мощности тепловыделения половины продукта может быть представлена следующей формулой:

$$W = Hk \frac{\rho}{0.238} V e^{-kt},$$

где H — энтальпия образования продукта, кДж/моль, k — константа скорости реакции, с^{-1} , ρ — плотность продукта, кг/м^3 , V — объем продукта, м^3 .

В качестве начального состояния для проведения нестационарного расчета CFD-модели печи, в котором учитывается тепловыделение продукта за счет реакции карботермического синтеза, был использован результат стационарного расчета CFD-модели с температурой нагревателей 1700°C и расходом газа, подаваемым в реторту, $6 \text{ м}^3/\text{ч}$. В качестве теплофизических свойств продукта задавались свойства UO_2 (плотность 10970 кг/м^3). Для константы скорости реакции $1.77 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ изменение температуры продукта со временем для точек измерения температуры продукта в крайней и центральной лодочках представлено на рис. 6.

При учете тепловыделения максимальный скачок температуры на продукте на всем моделируемом промежутке времени составляет 35.8°C . После непродолжительного скачка температуры примерно в течение 0.1 отн. ед. времени, далее температура продукта плавно снижается до исходного значения температуры, которая соответствует режиму изотермической выдержки без

учета тепловыделения в результате химической реакции карботермического синтеза.

Таким образом, тепловыделение за счет реакции карботермического синтеза незначительно влияет на температуру продукта в самом начале процесса, а затем сходит на нет. Поэтому все численные исследования CFD-модели печи были выполнены без учета тепловыделения продукта, обусловленного экзотермической реакцией карботермического синтеза.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

Распределение температуры по объему продукта в печи, как уже отмечалось выше, зависит от температуры нагревателей (реторты), расхода и температуры подаваемого в реторту газа. В результате 57 численных экспериментов с различной комбинацией этих параметров печи установлено, что определяющее влияние на температуру продукта, как и следовало ожидать, оказывает температура нагревателей.

На рис. 7 приведены в качестве примера результаты расчета распределения температуры на верхней поверхности шашек вдоль продольной оси реторты (по длине) для значений температуры нагревателей от 1670 до 1720°C при расходе $7 \text{ м}^3/\text{ч}$ и температуре подаваемого азота 20°C . Максимальная температура шашек устанавливается в середине центральной лодочки (в центре реторты) и монотонно убывает по направлению к торцам реторты. Минимальное значение температуры устанавливается на шашках, расположенных в крайнем ряду крайних лодочек. Разница между максимальной и минимальной температу-

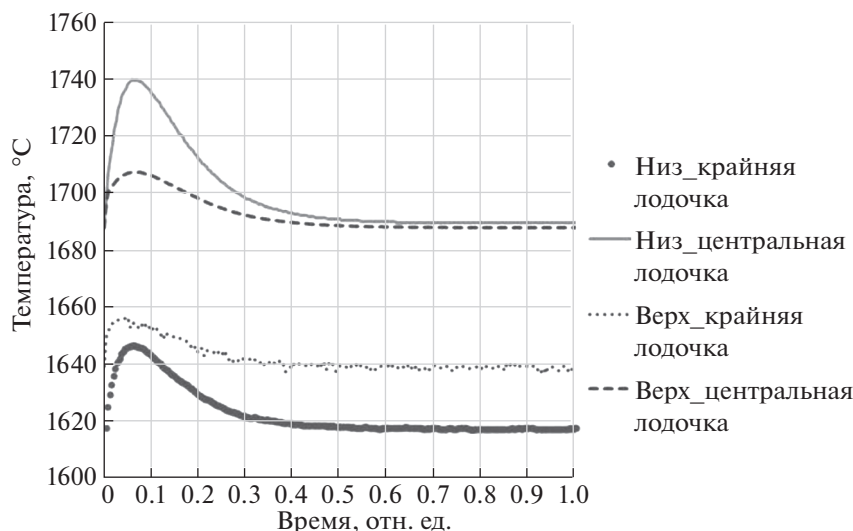


Рис. 6. Изменение температуры продукта в зависимости от времени ($1.77 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$).

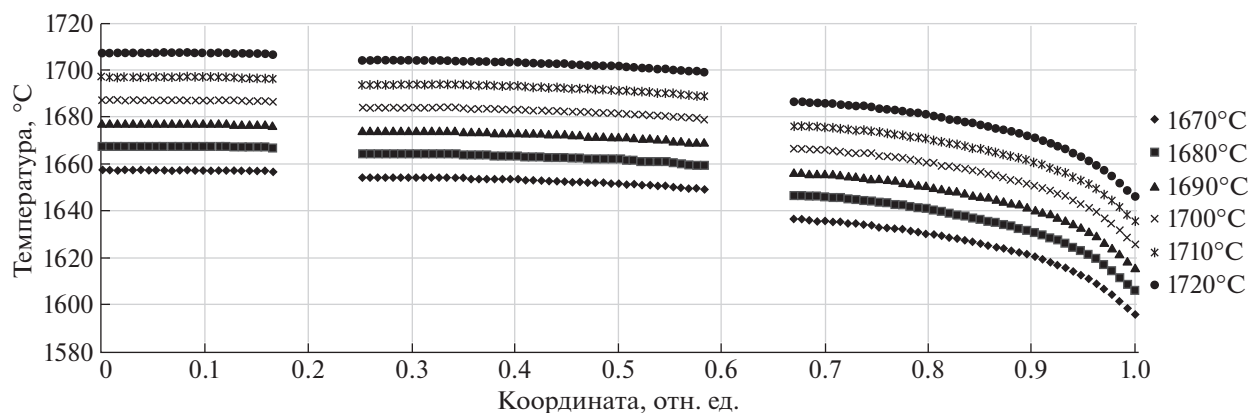


Рис. 7. Распределение температуры по длине продукта для расхода газа, подаваемого в реторту, $7 \text{ м}^3/\text{ч}$.

рой характеризует степень неравномерности температуры продукта по длине реторты печи.

Для температуры нагревателей 1670°C и расхода подаваемого газа $0 \text{ м}^3/\text{ч}$ эта разница по длине продукта составляет 58.1°C ; а при увеличении температуры нагревателей до 1720°C и расхода до $7 \text{ м}^3/\text{ч}$ эта неравномерность увеличивается незначительно — на 3.5°C и составляет 61.6°C .

Неравномерность температуры по высоте и ширине продукта в зависимости от температуры нагревателей выражена не так сильно, как в вышеприведенном случае по длине продукта. Так, неравномерность температуры по высоте продукта в центральной лодочке не превышает 0.6°C , а в крайних лодочках 9.5°C . В то время как неравномерность температуры по ширине продукта в центральной лодочке не превышает 1.7°C , а в крайних лодочках 6.4°C . Величины приведенных

неравномерностей температуры практически не зависят от расхода газа.

Исследование влияния температуры и расхода подаваемого в реторту азота на температуру продукта было выполнено для одного значения температуры нагревателей 1700°C , так как при других значениях температуры нагревателей картина распределения температуры на продукте принципиально не изменяется.

Результаты расчетов показали, что изменение температуры подаваемого в реторту азота в диапазоне от 20 до 600°C практически не влияет на температуру продукта. Так, в центральной лодочке температура продукта увеличивается на 0.7°C , а в крайних лодочках на 2.6°C (рис. 8а).

При увеличении расхода газа происходит небольшое уменьшение температуры продукта. Так, при увеличении расхода до $18 \text{ м}^3/\text{ч}$ температура продукта в центральной лодочке уменьшает-

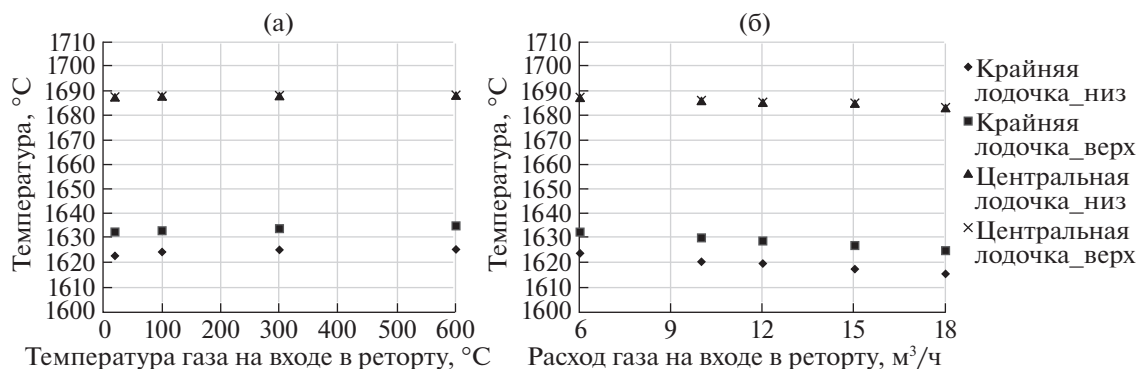


Рис. 8. Распределение температуры по высоте продукта в зависимости от температуры (а) и расхода газа (б), подаваемого в реторту.

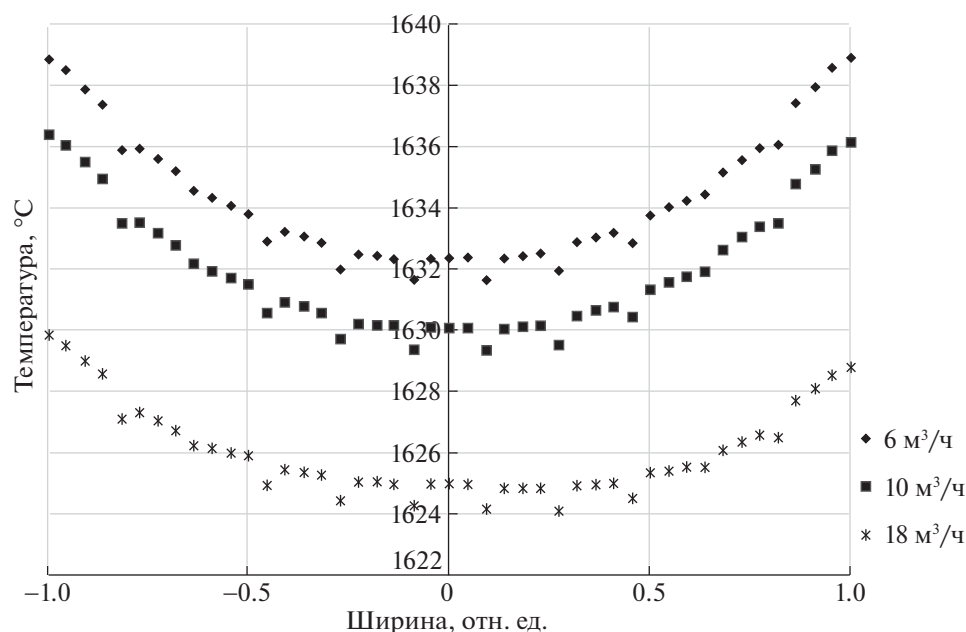


Рис. 9. Распределение температуры по ширине продукта в крайней лодочке в зависимости от расхода газа, подаваемого в реторту.

ся на 4.2°C , а в крайних лодочках на 7.9°C (рис. 8б). При этом распределение температуры продукта по ширине носит параболический характер с минимумом температуры вдоль продольной оси реторты и с максимумом около стенок лодочек (рис. 9). Разница температур продукта у боковых стенок лодочек и их серединой не превышает 10.2°C .

Анализ движения газовых потоков внутри реторты показывает, что в местах расположения продукта отсутствуют ярко выраженные застойные зоны. При этом на поверхности шашек в лодочках скорость движения газа принимает минимальные значения порядка 0.1 м/с (рис. 10 и 11).

Основной поток газа движется преимущественно в верхней части реторты в направлении

трубы отвода печных газов. Увеличение расхода приводит к более интенсивному перемешиванию потоков газа внутри реторты и к более яркой выраженной неравномерности их скорости в различных частях реторты от 0.1 до $\sim 1.0\text{ м/с}$ (рис. 11).

Учитывая тот факт, что ни температура, ни расход газа, подаваемого в реторту, не влияют существенно образом на температуру продукта, выбор расхода газа следует производить исходя из анализа протекания реакции карботермического синтеза. Результаты расчетов показывают, что с точки зрения поддержания температуры продукта в пределах $1650 \pm 50^{\circ}\text{C}$ особых жестких ограничений по расходу газа нет.

Для обеспечения информационной поддержки пользователей созданной CFD-модели при

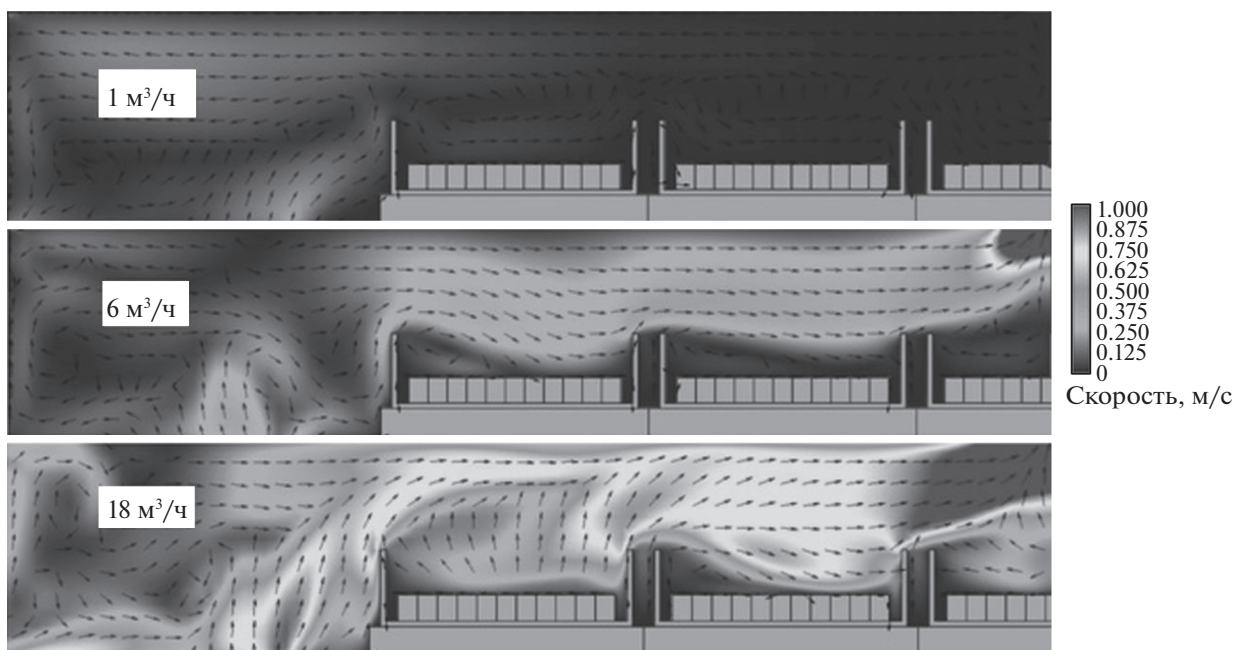


Рис. 10. Характерная картина движения газовых потоков в центральном сечении зоны реакции печи для расходов газа, подаваемого в реторту, — 1, 6 и 18 м³/ч.

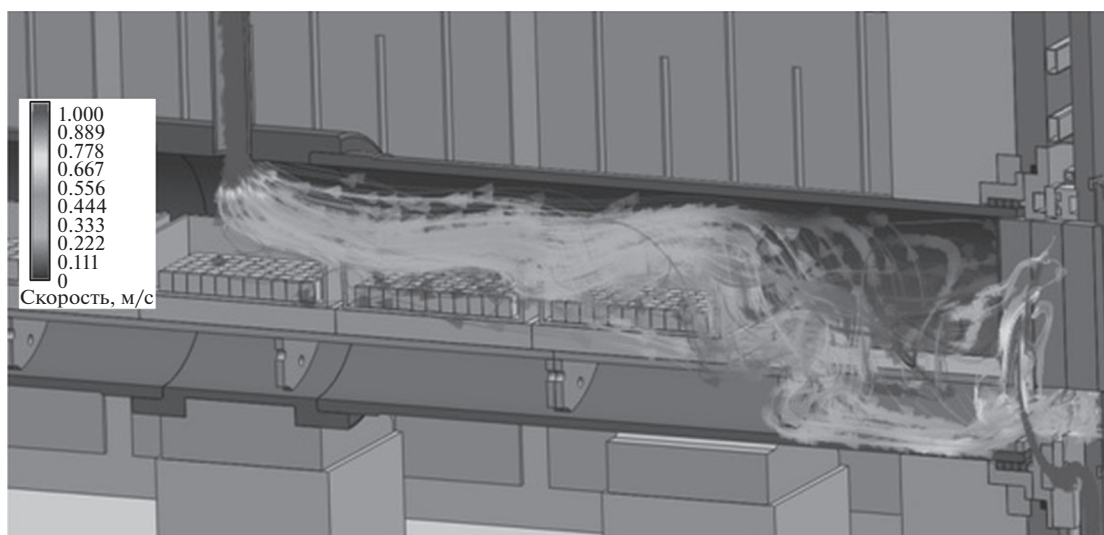


Рис. 11. Характерная картина движения газовых потоков в зоне реакции печи для случая с расходом газа 7 м³/ч и температурой нагревателей 1700°C.

проведении анализа полученных расчетных результатов и для выдачи рекомендаций по выбору эксплуатационных параметров печи в процессе изотермической выдержки загруженного в них продукта была создана программа ЭВМ [14].

ВЫВОДЫ

С помощью разработанной и верифицированной CFD-модели выполнены численные исследова-

ния распределения температуры по объему загруженного в печь продукта (равномерно сложенные в лодочки в несколько рядов и слоев шашки) и газодинамических потоков азота и азотоводородной смеси во внутреннем пространстве реторты печи, где протекает реакция карботермического синтеза нитридов урана и плутония. Из полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Конструктивные особенности печи карботермического синтеза нитридов урана и плутония являются причиной неравномерного распределения температуры по объему продукта с максимумом температуры в середине реторты и монотонным понижением в стороны ее торцов. Существует достаточно широкий диапазон технологических параметров печи — температура нагревателей, расход и температура газа, подаваемого в реторту, которые позволяют гарантированно обеспечивать температуру всего объема продукта в границах диапазона $1650 \pm 50^\circ\text{C}$ для протекания реакции карботермического синтеза нитридов урана и плутония. При этом показано, что максимальное значение неравномерности температуры по объему продукта не превышает 65°C .

2. Анализ характера движения газовых потоков внутри реторты свидетельствует о том, что обеспечивается доставка азота и азотоводородной смеси в зону реакции всего объема продукта, а также отвод газовых продуктов реакции из реторты. Учитывая то, что расход и температура газа не оказывают существенного влияния на температуру продукта внутри реторты — их выбор следует производить с учетом оптимального протекания химической реакции карботермического синтеза нитридов урана и плутония.

3. Изменение теплофизических свойств продукта при превращении UO_2 и PuO_2 в $(\text{U}, \text{Pu})\text{N}$ в результате реакции карботермического синтеза не приводит к заметному изменению температуры продукта и, следовательно, не влияет на протекание реакции.

4. В начале экзотермической реакции синтеза происходит выделение тепловой энергии, что приводит к временному увеличению температуры продукта на 35.8°C . При разработке технологии карботермического синтеза нитридов урана и плутония необходимо принимать во внимание этот эффект.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Rachkov V.I., Adamov E.O., Lopatkin A.V., Pershukov V.A., Troyanov V.M.* Fast Reactor Development Programme in the Russian Federation // Proceedings of an International Conference on Fast Reactors and related Fuel Cycles: Safe Technologies and Sustainable Scenarios (FR13). Paris, 2013. P. 93–102.
2. *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.
3. *Adamov E.O., Rachkov V.I.* New technological platform for the national nuclear energy strategy development // Thermal engineering. 2017. V. 64. № 13. P. 945–951.
4. *Троянов В.М., Грачев А.Ф., Забудько Л.М., Скупов М.В.* Перспективы использования нитридного топлива в быстрых реакторах с замкнутым топливным циклом // Атомная энергия/ 2014. Т. 117. № 2. С. 69–75.
5. *Грачев А.Ф., Забудько Л.М., Глушков А.Е., Иванов Ю.А., Киреев Г.А., Скупов М.В., Гильмутдинов И.Ф., Гринь П.И., Звир Е.А., Крюков Ф.Н., Никитин О.Н.* Исследования смешанного нитридного уран-плутониевого топлива в рамках проекта “ПРОРЫВ” // Атомная энергия. 2017. Т. 122. № 3. С. 156–167.
6. *Denisov A.L., Reynaud V., Smirnov V.P., Pavlov S.V., Reynard F., Chamovskikh 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.
7. *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. № 5. С. 284–287.
8. *Шамсутдинов Р.Н., Павлов С.В., Лещенко А.Ю.* Разработка и верификация CFD-модели печи карботермического синтеза нитридов урана и плутония // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2019. № 4. С. 130–141.
9. *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.
10. *Sobachkin A., Dumnov G.* Numerical basis of CAD-embedded CFD. Dassault systems, 2014. P. 19.
11. *Wilcox D.C.* Turbulence Modeling for CFD. La Canada, California: DCW Industries, 1998. P. 460.
12. *Roache P.J.* Fundamentals of computational fluid dynamics. Albuquerque, New Mexico: Hermosa Publishers, 1998. P. 648.
13. *Bardelle P., Warin D.* Mechanism and kinetics of the uranium-plutonium mononitride synthesis // Journal of Nuclear Materials. 1992. V. 188. P. 36–42.
14. *Павлов С.В., Шамсутдинов Р.Н., Моисеев В.С.* Программа для расчета температуры в ретортной садовой печи. Свидетельство РФ № 2020610998 об официальной регистрации программы для ЭВМ, 2020.

CFD Modeling of the Thermophysical Parameters of a Furnace for the Carbothermal Synthesis of Uranium and Plutonium Nitrides

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

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

^b Dimitrovgrad Engineering and Technological Institute, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Dimitrovgrad, Ul'yanskaya oblast, 433507 Russia

^c Proryv Company, Moscow, 107140 Russia

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

Received March 29, 2021; revised April 5, 2021; accepted April 13, 2021

Abstract—The temperature distribution, gas flow pattern and velocity in the reaction zone of a furnace for the carbothermal synthesis of uranium and plutonium nitrides have been numerically analyzed. The heater temperature, flow rate and temperature of the gas supplied to the furnace retort are the input data for the analysis. The analysis is performed using a CFD model of the furnace developed and validated for the isothermal holding and transient modes of the furnace. The CFD model takes into account two specific features of the carbothermal synthesis reaction of uranium and plutonium nitrides such as a change in the thermophysical properties of the charge in the process of transformation of UO_2 and PuO_2 into (U, Pu)N, and heat release during the exothermic reaction. The furnace has a fairly wide range of process parameters, which make it possible to ensure the temperature of the entire volume of the charge within the range of $(1650 \pm 50)^\circ\text{C}$ for the carbothermal synthesis of uranium and plutonium nitrides. It has been shown that the maximum temperature unevenness in the charge volume does not exceed 65°C . The analysis of the gas flow pattern inside the retort shows that the delivery of nitrogen and nitrogen-hydrogen mixture to the reaction zone of the entire volume of the charge, as well as the removal of gaseous reaction products from the retort, is ensured. Since the gas flow rate and the temperature do not significantly affect the charge temperature inside the retort, these parameters should be selected taking into account the optimal behavior of the chemical carbothermal reaction for the synthesis of uranium and plutonium nitrides. The results of the numerical analysis illustrate the capabilities of CFD modeling of thermophysical processes inside the retort furnace at the equipment development stage and at the stages of selection and justification of the furnace operation modes.

Keywords: CFD, uranium nitride, plutonium nitride, furnace, carbothermal synthesis, numerical analysis

DOI: 10.1134/S2304487X21020103

REFERENCES

1. Rachkov V.I., Adamov E.O., Lopatkin A.V., Pershukov V.A., Troyanov V.M., *Fast Reactor Development Programme in the Russian Federation*, Proceedings of an International Conference on Fast Reactors and related Fuel Cycles: Safe Technologies and Sustainable Scenarios (FR13), Paris, 2013, pp. 93–102.
2. 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.
3. Adamov E.O., Rachkov V.I., New technological platform for the national nuclear energy strategy development, *Thermal engineering*, 2017, vol. 64, no. 13, pp. 945–951.
4. Troyanov V.M., Grachev A.F., Zabud'ko L.M., Skupov M.V., Perspektivy ispol'zovaniya nitridnogo topliva v bystrykh reaktorah s zamknutym toplivnym ciklom [Prospects for using nitride fuel in fast reactors with a closed fuel cycle], *Atomic Energy*, 2014, vol. 117, no. 2, pp. 69–75. (in Russian)
5. Grachev A.F., Zabud'ko L.M., Glushenkov A.E., Ivanov Y.A., Kireev G.A., Skupov M.V., Gil'mutdinov I.F., Grin' P.I., Zvir E.A., Kryukov F.N., Nikitin O.N., Issledovaniya smeshannogo nitridnogo uran-plutoniyevoogo topliva v ramkah proekta "PRORYV" [Investigations of Mixed Uranium-Plutonium Nitride Fuel in Project Breakthrough], *Atomic Energy*, 2017, vol. 122, no. 3, pp. 185–199. (in Russian)
6. 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 sys-

- tems for sustainable development (FR17), Yekaterinburg, 2017.
7. Smirnov V.P., Pavlov S.V., Ivanov D.V., Shamsutdinov R.N., Injutin N.V., Sidorenko D.M., Solopeco A.V., Sajfutdinov S.Ju., Davydov A.V., Chamovskih Yu.V., Sergeev N.G., Zozulja D.V., Ustanovka karbotermicheskogo sinteza nitridov dlya proizvodstva smeshannogo nitridnogo uran-plutoniyevo topiva [Carbothermal Facility for the Synthesis of Nitrides for Mixed Uranium-Plutonium Fuel Production], *Atomic energy*, 2019, vol. 125, no. 5, pp. 322–325. (in Russian)
 8. Shamsutdinov R.N., Pavlov S.V., Leshchenko A.Yu., Razrabotka i verifikaciya CFD-modeli pechi karbotermicheskogo sinteza nitridov urana i plutoniya [Development and verification of CFD model of carbothermal synthesis furnace for production of mixed nitride uranium-plutonium fuel], *Nuclear Energy and Technology*, 2020, vol. 6, no. 1, pp. 37–42. (in Russian)
 9. Aljamovskij A.A., Sobachkin A.A., Odincov E.V., Haritonovich A.I., Ponomarev N.B., *SolidWorks. Komp'yuternoe modelirovanie v inzhenernoj praktike* [SolidWorks. Computer modeling in engineering practice], SPb.: BHV-Peterburg, 2005, p. 800.
 10. Sobachkin A., Dumnov G., *Numerical basis of CAD-embedded CFD*. Dassault systems, 2014, pp. 1–19.
 11. Wilcox D.C., *Turbulence Modeling for CFD*, La Canada, California: DCW Industries, 1998, p. 460.
 12. Roache P.J., *Fundamentals of computational fluid dynamics*. Albuquerque, New Mexico: Hermosa Publishers, 1998, p. 648.
 13. Bardelle P., Warin D., Mechanism and kinetics of the uranium-plutonium mononitride synthesis, *Journal of Nuclear Materials*, 1992, vol. 188, pp. 36–42.
 14. Pavlov S.V., Shamsutdinov R.N., Moiseev V.S., *Programma dlya rascheta temperatury v retortnoy sadochnoy pechi* [Temperature calculation program for retort batch furnace], The certificate of Russian Federal Service for Intellectual Property no. 2020610998, 2020.