

На правах рукописи



**Шамсутдинов Ринат Нурисламович**

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЯ ЧИСЛЕННЫХ  
МОДЕЛЕЙ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ФАБРИКАЦИИ  
НИТРИДНОГО УРАН-ПЛУТОНИЕВОГО ЯДЕРНОГО  
ТОПЛИВА**

Специальность: 05.14.03 – «Ядерные энергетические установки,  
включая проектирование, эксплуатацию и вывод из  
эксплуатации» (технические науки)

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени кандидата  
технических наук

Димитровград – 2022

Работа выполнена в обществе с ограниченной ответственностью  
Научно-производственная фирма «Сосны»

**Научный руководитель:** **Павлов Сергей Владленович** доктор  
технических наук, доцент, заместитель  
директора по науке и технологиям  
ООО НПФ «Сосны»

**Официальные оппоненты:** **Троянов Владимир Михайлович**  
доктор технических наук, научный  
руководитель АО «ГНЦ РФ-ФЭИ»

**Лиханский Владимир Валентинович**  
доктор физико-математических наук,  
профессор, начальник отдела  
моделирования технологий ядерного  
топлива в НИЦ «Курчатовский  
институт»

**Светухин Вячеслав Викторович**  
доктор физико-математических наук,  
профессор, директор  
«НПК «Технологический центр»

Защита состоится «29» июня 2022 года в        час.        мин. на  
заседании диссертационного совета МИФИ.01.03 федерального  
государственного автономного образовательного учреждения  
высшего образования «Национальный исследовательский ядерный  
университет «МИФИ» (115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте  
<https://ds.mephi.ru/> федерального государственного автономного  
образовательного учреждения высшего образования  
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».  
Автореферат разослан «        »        2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета, к.т.н.



Куликов Е.Г.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы исследования**

Ключевым направлением развития современной ядерной энергетики в России является реализация проекта «Прорыв», в рамках которого планируется создать модуль фабрикации/рефабрикации (МФР) нитридного уран-плутониевого топлива на площадке опытно-демонстрационного энергетического комплекса (ОДЭК) АО «СХК» в городе Северск. К реализуемым теплофизическим процессам в высокотемпературном печном оборудовании для крупномасштабной фабрикации таблеток нитридного уран-плутониевого топлива выдвигаются строгие требования по температуре и составу газовых сред. Для выбора новых конструктивных и технических решений, прогнозирования протекающих теплофизических процессов и обоснования режимов эксплуатации разрабатываемого высокотемпературного печного оборудования необходима комплексная научно-техническая поддержка. Одним из возможных вариантов решения данных задач является разработка и экспериментальная проверка CFD-моделей (Computational fluid dynamics – вычислительная гидродинамика) высокотемпературного печного оборудования для фабрикации таблеток нитридного уран-плутониевого топлива. Результаты расчетных исследований протекающих в высокотемпературном печном оборудовании теплофизических процессов, полученные с помощью данных CFD-моделей, могут быть использованы для определения рекомендуемых параметров оборудования, обеспечивающих требуемые режимы их эксплуатации. В связи с этим, разработка и расчетно-экспериментальные исследования численных моделей (CFD-моделей) высокотемпературного печного оборудования для фабрикации таблеток нитридного уран-плутониевого топлива является **актуальной** темой исследования.

### **Степень разработанности темы исследования**

Значительный вклад в разработку технологии фабрикации таблеток (U, Pu)N в лабораторных условиях внесли Blank H., Bernard H., Погозкин Б.Д., Ganguly C., Arai Y., Pautasso G., Richter K., Bardelle P., Warin D., Greenhalgh W.O., Ватулин А.В. и другие. Однако, опыт крупномасштабной фабрикации таблеток (U, Pu)N в настоящее время отсутствует. В связи с этим,

сейчас в России впервые разрабатывается новое высокотемпературное печное оборудование для карботермического синтеза и спекания таблеток нитридного уран-плутониевого топлива. Для выбора новых технических решений, обоснования протекающих теплофизических процессов и режимов эксплуатации разрабатываемого высокотемпературного печного оборудования необходимо разработать CFD-модели печей карботермического синтеза и спекания таблеток (U, Pu)N.

### **Цель и задачи диссертационной работы**

Цель работы – разработка и расчетно-экспериментальное обоснование численных моделей печи карботермического синтеза нитридов и канала печи спекания таблеток нитридного уран-плутониевого топлива для выбора конструкции, тепловых и газодинамических режимов эксплуатации этих печей.

Для достижения поставленной цели должны быть решены следующие научно-технические задачи:

1. Разработать и экспериментально проверить CFD-модель печи карботермического синтеза нитридов.
2. Разработать экспериментальный стенд для газодинамических исследований канала печи спекания таблеток нитридного уран-плутониевого топлива.
3. Разработать CFD-модель канала печи спекания таблеток нитридного уран-плутониевого топлива и выполнить проверку её достоверности с помощью сравнения численных результатов расчетов с результатами экспериментов на стенде для газодинамических исследований и печи спекания.
4. Выполнить расчетные исследования с помощью созданных CFD-моделей печи карботермического синтеза нитридов и канала печи спекания таблеток нитридного уран-плутониевого топлива для обоснования технических решений по конструкциям печей и для выдачи рекомендаций по теплофизическим и газодинамическим параметрам их эксплуатации.

### **Научная новизна**

1. Разработана и экспериментально проверена для изотермических и нестационарных режимов работы CFD-модель печи карботермического синтеза нитридов урана и плутония в программном комплексе SolidWorks Flow Simulation.
2. Определены интервалы температуры нагревателей печи карботермического синтеза нитридов для обеспечения

равномерного профиля температуры на загруженном продукте в диапазоне  $1650 \pm 50$  °C.

3. Показано с помощью CFD-модели печи карботермического синтеза нитридов, что:

- в начале экзотермической реакции синтеза, за счет выделения тепловой энергии происходит увеличение температуры продукта на 35-50 °C с последующим плавным снижением до значений, соответствующих режиму изотермической выдержки  $1650 \pm 50$  °C.

- изменение теплофизических свойств продукта при получении (U, Pu)N восстановлением  $UO_2$  и  $PuO_2$  в потоке азота и азотоводородной смеси в результате реакции карботермического синтеза не приводит к заметному изменению температуры продукта и, следовательно, не влияет на протекание реакции.

- расход и температура газа, подаваемого в реторту, не оказывают значимого влияния на температуру продукта внутри печи при постоянной температуре нагревателей, и их выбор следует производить с учетом оптимального протекания химической реакции карботермического синтеза нитридов урана и плутония.

4. Разработана в программном комплексе Ansys Fluent и экспериментально проверена CFD-модель, предназначенная для моделирования разнонаправленных потоков газа в канале печи спекания таблеток.

5. Показано, что для принятых научно-технических решений (схема подачи газов, конструкция барьеров, узлов подачи и отвода газов) обеспечивается трехзонное разделение газов в канале печи спекания таблеток:

- в зоне нагрева и охлаждения содержание азота менее 0,1 об.%;

- в зоне спекания в температурной области 1850-1950 °C содержание азота более 50 об.%.

6. Получена зависимость для концентрации азота в канале печи спекания таблеток нитридного уран-плутониевого топлива от подаваемых расходов азотоводородной смеси и аргона.

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

1. Доказана эффективность CFD-моделирования при создании сложного высокотемпературного печного оборудования для фабрикации таблеток нитридного уран-плутониевого топлива.

2. Результаты расчетов, полученные с помощью созданных CFD-моделей печи карботермического синтеза нитридов и канала печи спекания таблеток нитридного уран-плутониевого топлива, были

использованы при создании оборудования участков карботермического синтеза нитридов и спекания таблеток нитридного уран-плутониевого топлива для МФР ОДЭК на площадке АО “СХК” в городе Северск в рамках проекта “Прорыв”.

3. Обоснованный метод трехзонного разделения газов в канале толкательной проходной печи может быть использован в других отраслях промышленности, где используется высокотемпературная обработка материалов в нескольких газовых средах.

4. Созданные CFD-модели планируется использовать при техническом сопровождении эксплуатации печей карботермического синтеза нитридов и спекания таблеток нитридного уран-плутониевого топлива в АО “СХК” и для их последующего совершенствования.

#### **Основные положения и результаты, выносимые на защиту**

1. CFD-модель печи карботермического синтеза нитридов урана и плутония в программном комплексе SolidWorks Flow Simulation и CFD-модель канала печи спекания таблеток нитридного уран-плутониевого топлива в программном комплексе Ansys Fluent.

2. Конструкция экспериментального стенда для газодинамических исследований канала печи спекания таблеток нитридного уран-плутониевого топлива.

3. Результаты расчетно-экспериментальных исследований в обоснование созданных CFD-моделей.

4. Результаты моделирования теплофизических и газодинамических процессов в печах карботермического синтеза нитридов и спекания таблеток нитридного уран-плутониевого топлива и рекомендации по параметрам режимов их эксплуатации.

#### **Личный вклад автора**

Лично соискателем и при его непосредственном участии:

– разработаны CFD-модели высокотемпературного печного оборудования для карботермического синтеза и спекания таблеток нитридного уран-плутониевого топлива с использованием программных комплексов SolidWorks Flow Simulation и Ansys Fluent.

– разработан экспериментальный стенд для газодинамических исследований канала печи спекания таблеток нитридного уран-плутониевого топлива.

– выполнена обработка результатов экспериментальных исследований, полученных на печи карботермического синтеза

нитридов, стенде для газодинамических исследований и канале печи спекания. Проведено тестирование и экспериментальная проверка разработанных CFD-моделей.

– с помощью созданных CFD-моделей выполнены расчетные исследования влияния параметров высокотемпературного печного оборудования на протекающие в них теплофизические процессы.

– выданы рекомендации для выбора теплофизических и газодинамических параметров эксплуатации печи карботермического синтеза нитридов урана и плутония и печи спекания таблеток нитридного уран-плутониевого топлива.

– разработана программа для ЭВМ и база данных для научно-технической поддержки созданных CFD-моделей высокотемпературного оборудования.

### **Степень достоверности и апробация результатов работы**

Достоверность полученных результатов основана на:

– использовании аттестованных программных продуктов SolidWorks Flow Simulation и Ansys Fluent;

– воспроизводимости полученных экспериментальных данных;

– использовании средств измерения утвержденного типа.

Основные результаты работы были представлены на:

– VI, VII, VIII научных семинарах «Моделирование технологий ядерного топливного цикла» (г. Снежинск, 2017-2019);

– научной сессии НИЯУ МИФИ «Актуальные проблемы инновационного развития ядерных технологий» (г. Северск, 2018);

– V международной научно-технической конференции «Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики» (МНТК НИКИЭТ-2018, г. Москва, 2018);

– XV международной конференции «Безопасность АЭС и подготовка кадров 2018» (г. Обнинск, 2018).

### **Публикации**

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 15 печатных изданиях: из них 5 публикаций в журналах, входящих в список ВАК (из них 3 в Scopus); 2 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ и БД в официальных изданиях Роспатента; 8 публикаций в других изданиях (в т.ч. реферируемых в РИНЦ).

### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 71 наименования. Основной текст состоит из

137 страниц, содержит 101 иллюстрацию, 16 таблиц и 4 приложения.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**В первой главе** приведен обзор литературных данных по особенностям протекания технологических процессов фабрикации нитридного уран-плутониевого топлива, где используется высокотемпературное печное оборудование. В частности, рассмотрены карботермический синтез нитридов урана и плутония, а также спекание таблеток  $(U, Pu)N$ . На основе выполненного обзора проанализированы требования к данным процессам и сформулированы проблемы разработки высокотемпературного печного оборудования для крупномасштабной фабрикации таблеток  $(U, Pu)N$ . Отмечено, что эффективным инструментом для обоснования принятых технических решений и прогнозирования протекающих теплофизических процессов при разработке высокотемпературного печного оборудования является использование CFD-моделирования. Приведено общее описание процесса разработки и экспериментальной проверки CFD-моделей высокотемпературного печного оборудования.

**Во второй главе** приведены описание основных этапов разработки и результаты экспериментальной проверки CFD-модели печи карботермического синтеза нитридов урана и плутония в SolidWorks Flow Simulation (рисунок 1). В частности сформулирована физическая постановка задачи, и разработаны геометрическая, математическая и сеточная модели печи.

Согласно физической постановке задачи, в ретортную садочную печь подается азот (азотоводородная смесь) в реторту и аргон в заретортное пространство, соответственно. В процессе передачи теплоты от нагревателей, размещенных в заретортном пространстве, происходит последовательно нагрев, изотермическая выдержка и охлаждение загруженных в лодочки продукта, которые размещены внутри реторты печи. Требуется найти распределение температуры в объеме печи в нестационарном и стационарном режиме работы. Основные допущения: жидкость и газы считаются сплошными однофазными ньютоновскими несжимаемыми средами, внутренние и внешние стенки проточных частей – гидравлически гладкими поверхностями.



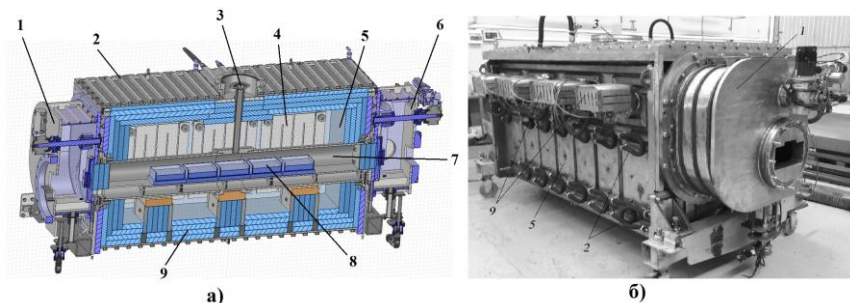


Рисунок 1 – Печь карботермического синтеза, 3D-модель (а) и внешний вид (б): 1, 6 – входной, выходной шиберы; 2 – контур водяного охлаждения корпуса; 3 – трубопровод отвода печных газов; 4 – электронагреватели; 5 – корпус; 7 – реторта; 8 – лодочки с продуктом; 9 – футеровка (а) и подвод электропитания (б)

В качестве основных уравнений математической модели для описания движения и теплообмена в газе в трехмерном случае в SolidWorks Flow Simulation использовались уравнения Навье-Стокса, осредненные по Рейнольдсу, законы сохранения массы, импульса и энергии. Эти уравнения дополнялись уравнением состояния газовой среды и зависимостями плотности, вязкости, теплоемкости и коэффициента теплопроводности от температуры. Теплопередача в твердых телах и излучение моделировались с помощью уравнения теплопроводности и закона Стефана-Больцмана, соответственно.

В CFD-модели в качестве начальных условий – задавались температура материалов печи, газовых сред и воды, а также давление, скорость газовых сред и воды; граничных условий – температура нагревателей, скорость, температура и давление на входе и выходе патрубков для подачи газовых сред и воды, границах расчетной области. По результатам исследования сеточной сходимости выбрана расчетная сетка с размерностью 7,65 млн ячеек.

Для экспериментальной проверки разработанной CFD-модели печи были использованы результаты температурных испытаний печи карботермического синтеза нитридов урана и плутония. Внутри реторты печи были размещены пять лодочек из вольфрама, в которые вместо прессованных порошков диоксидов урана и плутония с углеродом были загружены имитаторы с похожими

теплофизическими свойствами. Рабочие концы двух термопар (горячие спаи) были размещены внутри крайних лодочек на поверхности продукта на расстоянии  $\sim 15$  мм от наружной стенки лодочки. Третья термопара была размещена в центре центральной лодочки на поверхности продукта.

По результатам проведенных экспериментальных и расчетных исследований были получены зависимости температуры продукта в лодочках печи в местах размещения термопар от времени (рисунок 2).

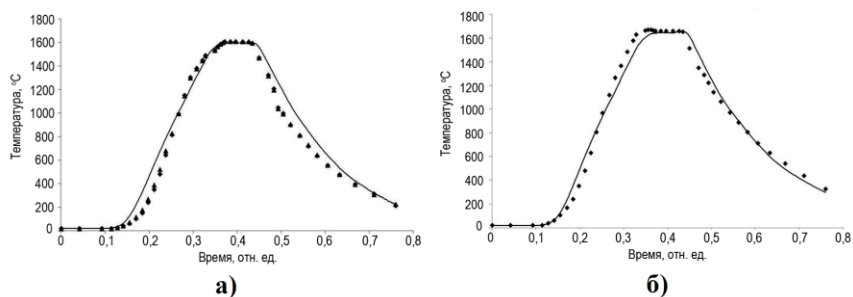


Рисунок 2 – Изменение температуры продукта в крайних (а) и центральной (б) лодочках при нагреве, выдержке и охлаждении печи: — — расчет, ■ — эксперимент

На рисунке 3 представлены расчетные и экспериментальные значения температуры на поверхности продукта в лодочках в процессе изотермической выдержки (в стационарном режиме).

Относительное отклонение расчетных значений температуры от экспериментальных составляет в крайних лодочках 0,7 %, а в центральной лодочке 0,1 %.

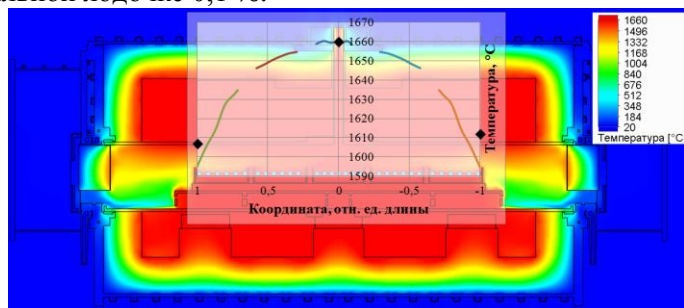


Рисунок 3 – Профиль температуры на поверхности продукта в процессе изотермической выдержки: — — расчет, ◆ — эксперимент

Полученные значения относительного отклонения расчетных и экспериментальных результатов свидетельствуют об адекватности разработанной CFD-модели как для описания изотермического, так и переходных режимов работы печи карботермического синтеза нитридов.

**В третьей главе** представлены результаты численных исследований CFD-модели печи карботермического синтеза нитридов урана и плутония. Цель исследований: определить распределение температуры на загруженном в печь продукте в зависимости от температуры нагревателей, расхода и температуры газа, подаваемого в реторту печи (рисунок 4).

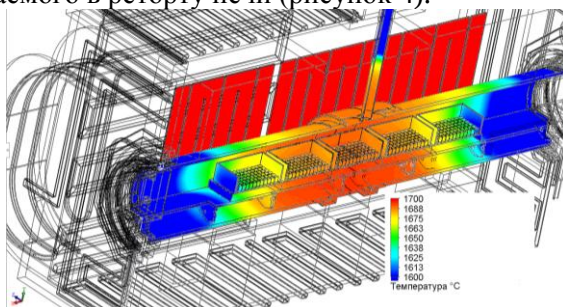


Рисунок 4 – Распределение температуры на поверхностях нагревателей и реторте печи с продуктом

В начале экзотермической реакции синтеза, за счет выделения тепловой энергии, происходит временное увеличение температуры продукта на 35-50 °С с последующим плавным снижением до значений, соответствующих режиму изотермической выдержки  $1650 \pm 50$  °С (рисунок 5).

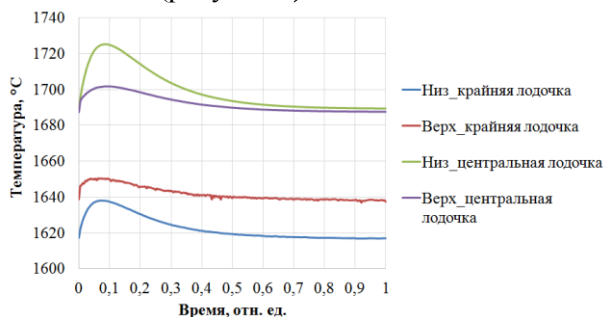


Рисунок 5 – Изменение температуры продукта в зависимости от времени

Показано, что изменение теплофизических свойств продукта при карботермическом синтезе  $\text{UO}_2$  и  $\text{PuO}_2$  в  $(\text{U}, \text{Pu})\text{N}$  практически не влияет на его температуру в процессе изотермической выдержки ( $1650 \pm 50$  °C) (рисунок 6).

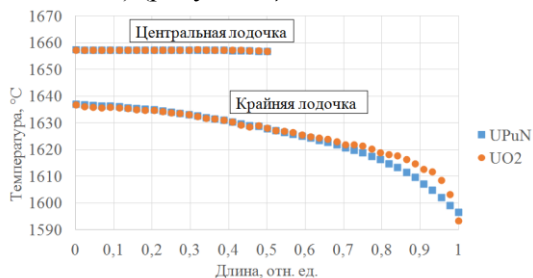


Рисунок 6 – Распределение температуры на поверхности продукта по длине (вдоль продольной оси реторты)

В CFD-модели печи при расчетах распределения температуры не учитывается выход газов из продукта в ходе реакции карботермического синтеза, так как их объем незначителен по сравнению с объемом подаваемых технологических газов и температура выходящих газов ( $\sim 1600$  °C) не оказывает существенного влияния на температуру продукта.

По результатам выполненных расчетных исследований установлено, что 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 её торцов. Максимальное значение неравномерности температуры по объему продукта не превышает  $62$  °C (рисунок 7).

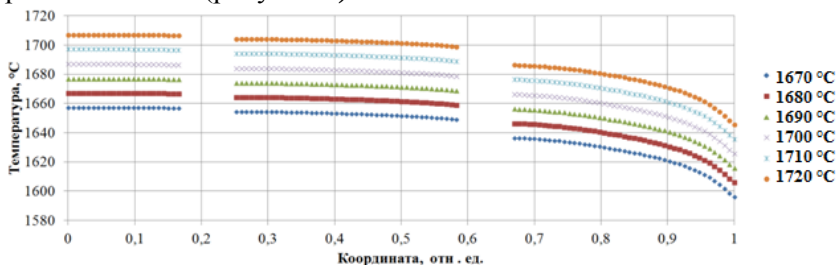


Рисунок 7 – Распределение температуры по длине продукта для температуры нагревателей от  $1670$  до  $1720$  °C (расход газа  $7 \text{ м}^3/\text{ч}$ )

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  $1650 \pm 50$  °С для протекания реакции карботермического синтеза нитридов урана и плутония. Так, для обеспечения изотермической выдержки загруженного в печь продукта при температуре  $1650 \pm 50$  °С в азотной и азотоводородной атмосфере рекомендуется задавать значение температуры нагревателей в диапазоне от 1685 °С до 1710 °С.

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 при постоянной температуре нагревателей – их выбор следует производить с учетом оптимального протекания химической реакции карботермического синтеза нитридов урана и плутония.

Показано, что разработанная CFD-модель позволяет выполнять моделирование аварийных режимов работы печи (отключение одной или двух из трех пар нагревателей, частичное или полное отключение водяного охлаждения и подачи газовых сред) для оценки степени их влияния на технологический режим работы печи и протекание процесса карботермического синтеза.

**В четвертой главе** приведено описание толкательной печи проходного типа, которая предназначена для спекания таблеток нитридного уран-плутониевого топлива (рисунок 8). Лодочки с продуктом последовательно проходят зоны нагрева, спекания и охлаждения.

При разработке печи были определены требования по составу газовых сред в различных температурных зонах канала печи:

- нагрев и охлаждение продукта при температурах ниже 1500 °С должны осуществляться в атмосфере аргона с содержанием азота в аргоне менее 0,1% об.;
- спекание продукта должно осуществляться при температуре 1850-1950 °С в течение 10 часов в атмосфере азот-аргон-водород с концентрацией азота не менее 50% об.

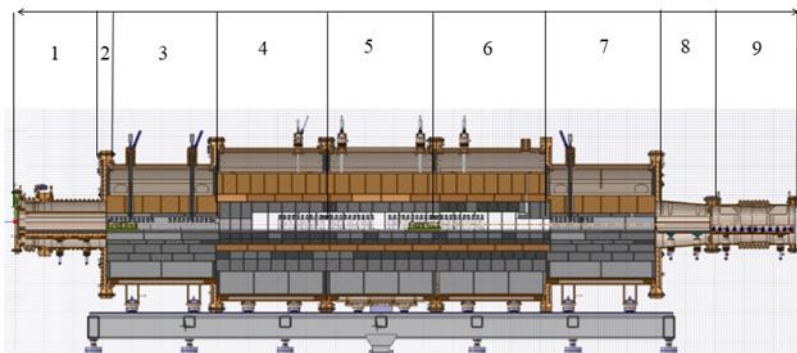


Рисунок 8 – 3D модель печи спекания: 1, 9 – входной и выходной сильфоны; 2 – входной модуль; 3 – модуль предварительного нагрева; 4 – вытяжной модуль; 5 – модуль спекания; 6 – модуль подачи газа; 7 – модуль охлаждения; 8 – выходной модуль

Для реализации данных требований была выбрана следующая схема подачи газов в канал печи (рисунок 9):

- 1) Аргон подается со стороны зоны нагрева (вход лодочек в канал) и со стороны зоны охлаждения (выход лодочек из канала).
- 2) Канал печи оборудован двумя барьерами, которые отделяют зону нагрева от зоны спекания (барьер I, рис. 9 а) и зону спекания от зоны охлаждения (барьер II, рис. 9 а). Барьеры перекрывают верхнюю и боковые части поперечного сечения канала таким образом, чтобы в нижней части канала оставалось достаточно места для движения лодочек.
- 3) Азотоводородная смесь подается в зону спекания со стороны барьера II, навстречу движению лодочек с топливными таблетками.
- 4) Отвод газов из канала печи производится в зоне спекания, около барьера I.

Для расчетно-экспериментального обоснования технических решений по обеспечению заданного состава газовых сред в канале печи спекания таблеток нитридного уран-плутониевого топлива был реализован алгоритм, основные этапы которого приведены на рисунке 10.

При разработке CFD-модели канала печи была сформулирована физическая постановка задачи, и разработаны геометрическая, математическая и сеточная модели канала печи спекания таблеток нитридного уран-плутониевого топлива.

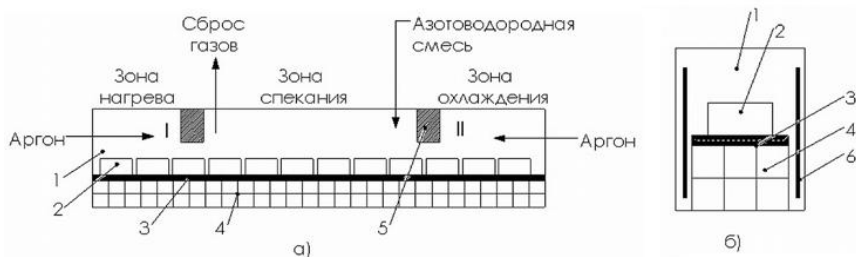


Рисунок 9 – Принципиальная схема канала печи спекания со схемой подачи газов: продольный (а) и поперечный (б) разрезы:

- 1 – канал; 2 – лодочка с таблетками; 3 – подложки;  
4 – скользящая кладка; 5 – барьер; 6 – нагреватель

Согласно физической постановке задачи в прямоугольный канал печи переменного П-образного сечения, разделенный барьерами (участки с меньшим проходным сечением) на три зоны (нагрева, спекания и охлаждения), подается аргон с обоих торцов канала печи и азотоводородная смесь через систему из распределенных отверстий, расположенных в барьере между зоной спекания и охлаждения. Отвод подаваемых технологических газов осуществляется через отверстие в зоне спекания ближе к барьеру около зоны нагрева. Вдоль боковых стенок прямоугольного канала печи попарно (друг напротив друга) установлены проволочные зигзагообразные нагреватели. В процессе передачи теплоты от нагревателей к стенкам прямоугольного канала и газовым средам возникает термодиффузия и диффузия подаваемых газов внутри канала печи. В результате этих теплофизических процессов в канале печи устанавливается стационарное распределение температуры и газовых сред. Требуется найти распределение температуры и концентрации технологических газов в объеме прямоугольного канала печи в стационарном режиме его работы. Основные допущения: газы считаются сплошными однофазными ньютоновскими несжимаемыми средами, стенки канала печи - гидравлически гладкие поверхности.

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. Размерность итоговой расчетной сетки канала печи спекания составляет 12,7 млн. элементов. В качестве начальных и граничных условий в CFD-модели задавались температура нагревателей, газовых сред, а также скорость, давление на входе и выходе газовых сред, подаваемых в канал печи спекания.

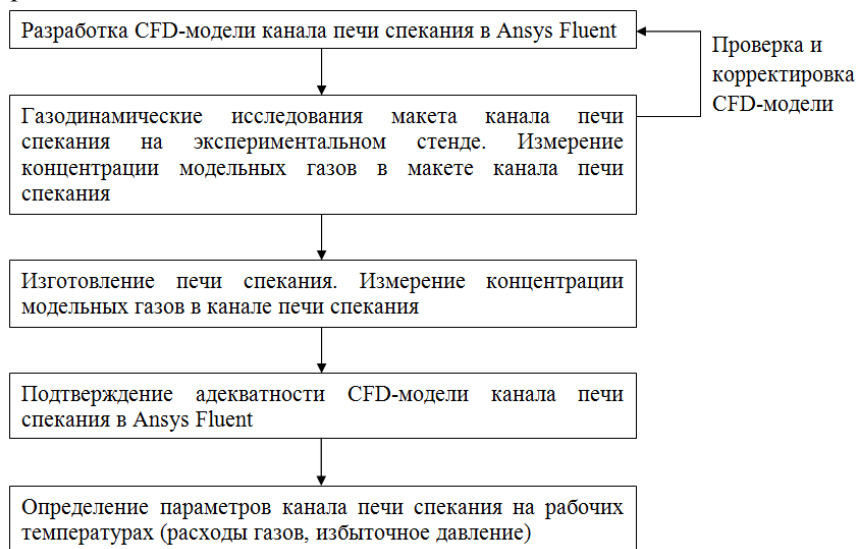


Рисунок 10 – Алгоритм расчетно-экспериментального обоснования технических решений

Для проверки CFD-модели был создан экспериментальный стенд для проведения измерений концентраций модельных газов при комнатной температуре в макете канала печи спекания (рисунок 11). Макет воспроизводит внутренние размеры канала печи спекания в масштабе 1:1. В качестве модельных газов использовали аргон и кислород (вместо азотоводородной смеси). Данный выбор обусловлен техническими сложностями, связанными с измерением содержания азота в аргоне в широком диапазоне концентраций и незначительным различием физико-химических свойств кислорода и азота.

Измерение концентрации газов в объеме макета канала осуществляли с помощью четырнадцати пробоотборных щупов, соединенных с измерительной системой стенда. В зонах нагрева и



охлаждения размещено по одному нерегулируемому шупу (1 и 6), в зоне спекания – четыре нерегулируемых шупа (2–5). С помощью этих щупов отбирали пробы газа в 20 мм над верхней поверхностью имитаторов лодочек с таблетками для изучения распределения концентрации кислорода по длине макета (координата X). Также в зоне спекания располагались восемь регулируемых щупов, позволяющих отбирать газ из заданной точки по высоте (7-12, координата Y) или ширине макета (13-14, координата Z).

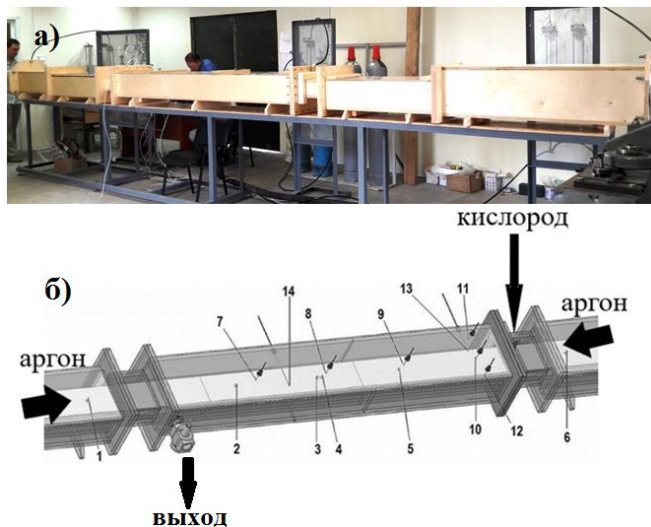


Рисунок 11 – Внешний вид макета канала печи (а) и расположение точек пробоотбора (б)

Выполнены экспериментальные исследования для основного варианта подачи газов (расход аргона: со стороны зоны нагрева  $8 \text{ н.м}^3/\text{ч}$ , со стороны зоны охлаждения  $4 \text{ н.м}^3/\text{ч}$ ; расход кислорода  $5 \text{ н.м}^3/\text{ч}$ ). На основе полученных экспериментальных данных на стенде осуществлена проверка разработанной CFD-модели и подтверждена эффективность принятых технических решений, которые обеспечивают трехзонное разделение газовых сред в канале печи спекания. В качестве иллюстрации на рисунке 12 приведены расчетные и экспериментальные значения концентрации кислорода в точках пробоотбора 7-9.

Наилучшее совпадение расчетных и экспериментальных значений концентрации кислорода в аргоне наблюдается в

центральной части канала (в области нахождения лодочек с таблетками ядерного топлива). Разница между расчетными и экспериментальными значениями концентрации кислорода у поверхности имитаторов лодочек с таблетками находится в диапазоне от 0,1 до 6,6 об. %.

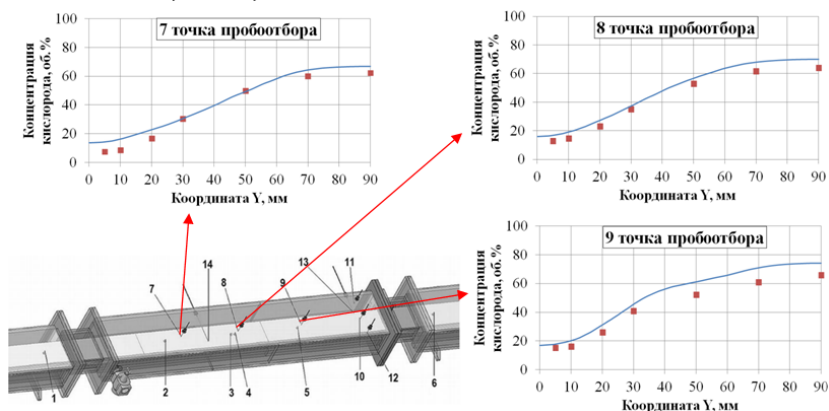


Рисунок 12 – Расчетные и измеренные значения объемной концентрации кислорода в точках пробоотбора 7-9

Получены экспериментальные данные по распределению концентрации кислорода в аргоне в канале печи спекания при комнатной температуре. На основе этих данных осуществлена проверка достоверности CFD-модели канала печи спекания (рисунок 13). Максимальная абсолютная разница между расчетными и экспериментальными значениями концентрации кислорода в точках пробоотбора 2-5 в канале печи спекания для всех вариантов испытаний не превышает 7 об. %.

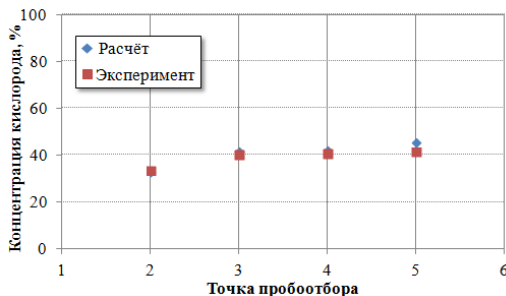


Рисунок 13 – Экспериментальные и расчетные значения объемной концентрации кислорода в канале печи спекания

Таким образом, подтверждена адекватность разработанной CFD-модели канала печи спекания таблеток.

**В пятой главе** приведены результаты расчетных исследований CFD-модели канала печи спекания таблеток нитридного уран-плутониевого топлива при рабочих температурах.

Проверено выполнение требований по составу газовых сред в различных зонах печи, где находится продукт (концентрация азота менее 0,1 об.% в температурной области ниже 1500 °С и концентрация азота больше 50 об.% в температурной области 1850-1950 °С) для основного варианта подачи расходов газов (расход аргона: со стороны зоны нагрева 8 н.м<sup>3</sup>/ч, со стороны зоны охлаждения 4 н.м<sup>3</sup>/ч; расход азотоводородной смеси 5 н.м<sup>3</sup>/ч), результаты которой представлены на рисунке 14.

Показано, что характер распределения концентрации азота в зоне спекания канала печи определяется конвективным движением газового потока в вертикальном направлении вдоль поверхности нагревателей и соотношением расходов азота и аргона, подаваемого со стороны зоны охлаждения печи (рисунок 15).

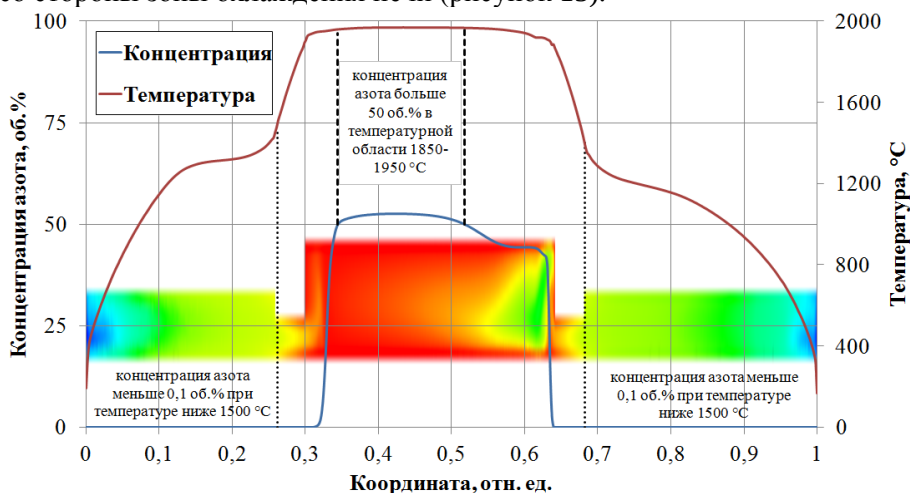


Рисунок 14 – Распределение температуры и концентрации азота на поверхности продукта по всей длине канала печи спекания

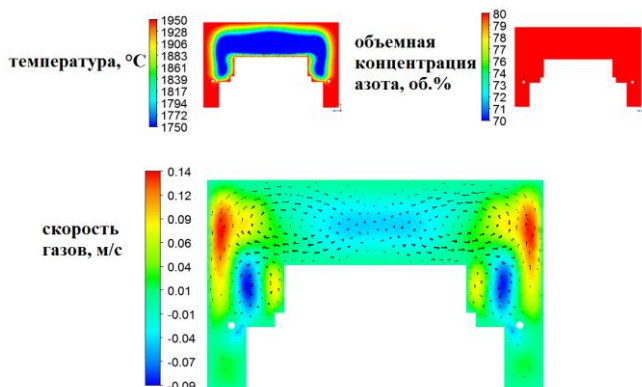


Рисунок 15 – Результаты расчета в поперечном сечении канала печи в середине зоны спекания (соотношение расхода азотоводородной смеси к аргону (охлаждение) – 7/1)

Получена зависимость для концентрации азота в канале печи спекания таблеток от соотношения подаваемых расходов азотоводородной смеси и аргона (рисунок 16). Определено минимально возможное значение (соотношение) расходов газов, при которых выполняется требование для концентрации азота менее 0,1 об.% в температурной области ниже 1500 °С.

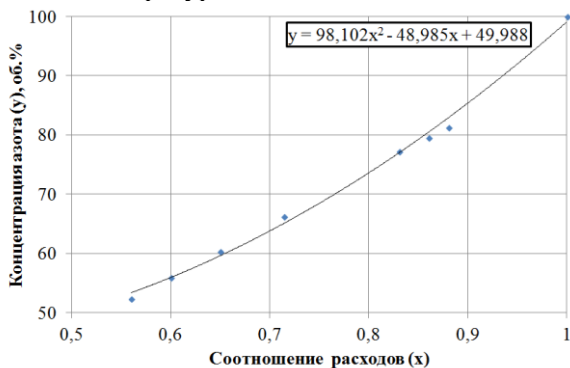


Рисунок 16 – Зависимость концентрации азота (координата 0,4 отн. ед.) от соотношения расхода азотоводородной смеси к сумме расходов азотоводородной смеси и аргона со стороны зоны охлаждения

Показано, что для выполнения требований по составу газовых сред рекомендуется выбирать соотношение расхода азотоводородной смеси к сумме расхода азотоводородной смеси и аргона со стороны зоны охлаждения в диапазоне от 0,6 до 0,97.

### **Основные выводы**

1. Разработана и экспериментально проверена в диапазоне температур до  $\sim 1700^\circ\text{C}$  для изотермических и нестационарных режимов работы CFD-модель печи карботермического синтеза нитридов урана и плутония в программном комплексе SolidWorks Flow Simulation. Экспериментально доказана адекватность разработанной CFD-модели. Показано, что относительное отклонение расчетных значений температуры загруженного продукта в крайних и центральной лодочках печи от экспериментальных значений при изотермической выдержке составляет 0,7 % и 0,1 %, соответственно.

2. Разработан экспериментальный стенд для газодинамических исследований канала печи спекания таблеток нитридного уран-плутониевого топлива. Экспериментальный стенд позволяет исследовать распределение концентрации кислорода в аргоне с помощью 6 нерегулируемых и 8 регулируемых пробоотборных щупов по длине, высоте и ширине канала печи спекания.

3. Разработана CFD-модель канала печи спекания таблеток нитридного уран-плутониевого топлива в программном комплексе Ansys Fluent и доказана её адекватность на экспериментальном стенде для газодинамических исследований и печи спекания. Максимальная абсолютная разница между расчетными и экспериментальными значениями концентрации кислорода в канале печи спекания для всех вариантов испытаний не превышает 7 об. %.

4. Выполнены расчетные исследования, по результатам которых обоснованы выбранные технические решения по конструкциям печей и выданы рекомендации для теплофизических и газодинамических параметров эксплуатации печей. Для печи карботермического синтеза нитридов:

- подтверждена выбранная концепция печи, согласно которой температура продукта определяется косвенно – по температуре нагревателей. Показано, что реализованная конструкция печи позволяет обеспечить равномерное распределение температуры продукта в диапазоне  $1650 \pm 50^\circ\text{C}$  во всем рабочем объеме реторты.
- выданы рекомендации для обеспечения изотермической

выдержки загруженного в печь продукта при температуре  $1650 \pm 50$  °С в азотной и азотоводородной атмосфере.

Для печи спекания таблеток нитридного уран-плутониевого топлива:

– показано, что для выбранных схемы подачи газов, конструкций барьеров, узлов подачи и отвода газов в канале печи обеспечивается трехзонное разделение газов с требуемым содержанием азота в зонах нагрева и охлаждения (менее 0,1 об.%), а также в зоне спекания (более 50 об.%).

– определена зависимость концентрации азота в зоне спекания от соотношения подаваемых расходов азотоводородной смеси и аргона.

– выданы рекомендации для диапазона соотношений расхода азотоводородной смеси и расходов аргона со стороны зон нагрева и охлаждения для обеспечения заданного трехзонного газового разделения канала печи.

Результаты расчетно-экспериментальных исследований диссертационной работы были использованы при создании оборудования участков карботермического синтеза нитридов и спекания таблеток нитридного уран-плутониевого топлива для МФР ОДЭК на площадке АО “СХК” в городе Северск в рамках проекта “Прорыв”.

#### **Список работ, опубликованных автором по теме диссертации**

1. Смирнов, В.П. Установка карботермического синтеза нитридов для производства смешанного нитридного уран-плутониевого топлива / В.П. Смирнов, С.В. Павлов, **Р.Н. Шамсутдинов** и др. // Атомная энергия. – 2018. – т. 125, №5. – с. 284-287 (БАК, Scopus).
2. Кузьмин, И.В. Экспериментальный стенд для газодинамических исследований канала печи спекания таблеток ядерного топлива / И.В. Кузьмин, А.Ю. Лещенко, **Р.Н. Шамсутдинов** и др. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2018. – №4. – с. 53-63 (БАК, Scopus).
3. **Шамсутдинов, Р.Н.** Разработка и верификация CFD-модели печи карботермического синтеза нитридов урана и плутония / Р.Н. Шамсутдинов, С.В. Павлов, А.Ю. Лещенко // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2019. – №4. – с. 130-141 (БАК, Scopus).
4. **Шамсутдинов, Р.Н.** CFD-моделирование теплофизических параметров печи карботермического синтеза нитридов урана и

плутония / Р.Н. Шамсутдинов, С.В. Павлов, А.Ю. Лещенко и др. // Вестник НИЯУ МИФИ. – 2021. – том 10, №2. – с. 151-161 (БАК).

5. **Шамсутдинов, Р.Н.** Расчетно-экспериментальное моделирование разнонаправленных потоков газов в прямоугольном канале печи спекания таблеток ядерного топлива / Р.Н. Шамсутдинов, С.В. Павлов, И.В. Кузьмин и др. // Вестник НИЯУ МИФИ. – 2021. – том 10, №4. – с. 363-374 (БАК).

6. **Шамсутдинов Р.Н.**, Павлов С.В., Лещенко А.Ю., Кузьмин И.В. Свидетельство о государственной регистрации базы данных №2018621663 «Результаты расчетно-экспериментальных исследований распределения газов в прямоугольном канале высокотемпературной печи», Официальные издания Роспатента, 2018 (БАК).

7. Павлов С.В., **Шамсутдинов Р.Н.**, Моисеев В.С. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2020610998 «Программа для расчета температуры в ретортной садовой печи», Официальные издания Роспатента, 2020 (БАК).

8. Kuzmin, I.V. Test bench for gas-dynamic studies in the furnace channel for nuclear fuel pellet sintering / I.V. Kuzmin, A.Yu. Leshchenko, **R.N. Shamsutdinov** et.al. // Nuclear Energy and Technology. – 2019. – iss. 5 (2). – pp. 171-175.

9. **Shamsutdinov, R.N.** Development and verification of CFD model of carbothermal synthesis furnace for production of mixed nitride uranium-plutonium fuel / R.N. Shamsutdinov, S.V. Pavlov, A.Yu. Leshchenko. // Nuclear Energy and Technology. – 2020. – iss. 6 (1). – pp. 37-42.

10. **Шамсутдинов, Р.Н.** Моделирование распределения газов в печи спекания для производства смешанного нитридного уран-плутониевого топлива / Р.Н. Шамсутдинов, А.Ю. Лещенко, С.В. Павлов // Сборник материалов VI научного семинара «Моделирование технологий ядерного топливного цикла». – Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ. – 2017. – с. 28.

11. **Шамсутдинов, Р.Н.** Расчетно-экспериментальные исследования теплофизической модели печи карботермического синтеза / Р.Н. Шамсутдинов, А.Ю. Лещенко, С.В. Павлов // Сборник материалов VII научного семинара «Моделирование технологий ядерного топливного цикла». – Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ. – 2018. – с. 35.

12. **Шамсутдинов, Р.Н.** Верификация теплофизической модели печи карботермического синтеза нитридов / Р.Н. Шамсутдинов,

С.В. Павлов // Сборник материалов конференции «Актуальные проблемы инновационного развития ядерных технологий». – Северск: СТИ НИЯУ МИФИ. – 2018. – с. 143.

13. **Шамсутдинов, Р.Н.** Расчетно-экспериментальное обоснование конструкции рабочего канала печи спекания таблеток смешанного нитридного уран-плутониевого топлива / Р.Н. Шамсутдинов, С.В. Павлов, А.Ю. Лещенко и др. // Сборник докладов V международной научно-технической конференции «Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики» (МНТК НИКИЭТ-2018). – Москва: АО «НИКИЭТ». – 2018. – с. 1528-1535.

14. **Шамсутдинов, Р.Н.** Экспериментальный стенд для газодинамических исследований канала печи спекания таблеток ядерного топлива / Р.Н. Шамсутдинов, И.В. Кузьмин, А.Ю. Лещенко и др. // Сборник материалов XV международной конференции «Безопасность АЭС и подготовка кадров». – Обнинск: ИАТЭ НИЯУ МИФИ. – 2018. – с. 186-187.

15. **Шамсутдинов Р.Н.** Результаты моделирования канала печи спекания ядерного топлива / Р.Н. Шамсутдинов, С.В. Павлов, А.Ю. Лещенко и др. // Сборник материалов VIII научного семинара «Моделирование технологий ядерного топливного цикла». – Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ. – 2019. – с. 37-38.