

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего  
образования «Донецкий национальный технический университет»

*На правах рукописи*

**Начкебия Наталья Сергеевна**

УДК 621.783.2(043)

**ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛООБМЕННЫХ  
НАСАДОК КОМПАКТНЫХ РЕГЕНЕРАТИВНЫХ ГОРЕЛОК**

Специальность 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника  
(технические науки)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой  
степени кандидата технических наук

Донецк - 2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
**БИРЮКОВ Алексей Борисович**  
ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет», проректор, заведующий кафедрой «Техническая теплофизика», (г. Донецк).

Официальные оппоненты: доктор технических наук, доцент  
**ЕРЕМИН Антон Владимирович**  
ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», проректор по научной работе СамГТУ, начальник молодежной лаборатории «Тепловые процессы в химической технологии (ТЕРМОХИМ)», заведующий кафедрой «Промышленная теплоэнергетика», (г. Самара).

кандидат технических наук, доцент  
**ПОКИНТЕЛИЦА Елена Анатольевна**  
«Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» – филиал ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», доцент кафедры «Физика и прикладная химия», (г. Макеевка).

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет», (г. Казань).

Защита состоится «28» мая 2026 года в 12 - 00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.491.02 при ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет» по адресу: ул. Артема, 58, I учебный корпус, аудитория 1.203, г. Донецк, г.о. Донецкий, Донецкая народная республика, 283001.

Тел. факс: +7(856) 301-07-69, e-mail: donntu.info@mail.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «ДонНТУ» по адресу: г. Донецк, ул. Артема, 58, II учебный корпус и на сайте <http://donntu.ru>

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.2.491.02  
доктор технических наук, доцент

В.О. Гутаревич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Значительная часть энергопотребления в промышленности связана с использованием тепловой энергии. При этом особое место занимают высокотемпературные процессы, на обеспечение которых тратится большое количество топлива. Использование теплоты отходящих дымовых газов промышленных агрегатов является одним из наиболее перспективных направлений энергосбережения.

Задачи использования теплоты продуктов сгорания топлива решаются путем применения теплообменных аппаратов. Последние несколько десятилетий в мировой практике успешно применяются регенеративные и рекуперативные горелки. Регенеративные горелки зарекомендовали себя как наиболее эффективный способ повышения энергоэффективности технологических процессов с рабочей температурой более 800°C. Несмотря на это, до сих пор вопрос определения рациональных технологических и эксплуатационных параметров регенеративных горелок не является окончательно решенным, так как отсутствуют универсальные методики расчета. Параметры работы регенеративных горелок устанавливаются производителем по результатам их исследований, и эти характеристики не всегда являются доступной информацией. Производители регенеративных горелок считают свои методики определения рациональных параметров работы и других показателей этих устройств коммерческой тайной. В этой связи разработка научно обоснованных методик определения рациональных параметров, обеспечивающих эффективную эксплуатацию данного оборудования, является актуальной научно-технической задачей, имеющей отраслевое значение.

**Степень разработанности темы исследования.** Вопросам теплообменных процессов компактной регенеративной насадки посвящено много исследований (например, в работы В.И. Губинского, М.В. Губинского, Ю.Л. Курбатова, А.Б. Бирюкова, Г.М. Дружинина, Г.М. Затопляева, С.К. Попова и др.). В частности, разработан ряд математических моделей для анализа процессов теплообмена в насадке устройства. Многие из современных исследователей используют научные инструменты, ранее разработанные для расчета работы классических регенераторов шахтных и нагревательных печей, которые существенно отличаются в конструктивном плане. В связи с этим можно считать, что на данный момент отсутствует научно обоснованная методика для расчета компактных регенеративных горелок, что подтверждает актуальность данной работы.

**Связь работы с научными программами, планами, темами.** Работа выполнена в соответствии с планами научного направления кафедры технической теплофизики Донецкого национального технического университета «Развитие теоретических и технологических основ рационального управления тепломассообменными процессами в различных технологиях» и является частью исследований, проведенных в рамках госбюджетной темы «Совершенствование тепломассообменных процессов и режимов работы оборудования для тепловой обработки материалов» № Н-2022-13, в выполнении которой автор принимал участие в качестве исполнителя. По завершении госбюджетной темы исследования продолжились в рамках молодежной научной лаборатории ДонНТУ

«Приборостроение и станкостроение» путем решения задачи построения системы диагностирования параметров работы регенеративных горелок.

**Цель и задачи исследования.** Цель работы – разработка методики теплового и конструктивного расчета характеристик шариковой насадки регенеративной горелки, экспериментальное подтверждение полученных результатов, обоснование рациональных параметров работы горелки для повышения энергоэффективности.

Для достижения поставленной цели сформулированы и решены следующие основные задачи:

- проведен анализ известных научных и технических решений в области совершенствования параметров регенеративных горелок;
- разработана математическая модель расчета теплообмена в теплообменной насадке компактной регенеративной горелки и подтверждена ее адекватность;
- разработана расчетная методика, позволяющая определить конструктивные и технологические параметры работы регенеративной горелки;
- определены рациональные параметры регенеративных горелок;
- разработаны рекомендации по практическому применению полученных результатов исследований.

Объект исследования – теплообменные процессы в насадке регенеративной горелки.

Предмет исследования – рациональные конструктивные и технологические параметры насадок регенеративных горелок.

#### **Научная новизна полученных результатов.**

1. Впервые в результате исследований установлено, что изменение температуры продуктов сгорания на выходе из насадки в период «дымовой» фазы подчиняется логарифмической зависимости.

2. Впервые получено критериальное уравнение, устанавливающее зависимость величины параметра, характеризующего изменение температуры продуктов сгорания на выходе из насадки, от различных факторов, и позволяющее определить эту величину при проектировании регенеративной горелки.

3. Получены значения оптимального с точки зрения максимизации коэффициента использования топлива времени переключения клапанов регенеративных горелок.

**Теоретическая значимость работы** состоит в разработке математического аппарата для установления зависимости изменения температуры продуктов сгорания на выходе из компактной насадки регенеративной горелки во времени, развитии методов определения рациональных параметров теплообменных насадок регенеративных горелок за счет разработки новых научных методик, позволяющих определять изменение температур газообразных теплоносителей и насадки, рациональные значения геометрических параметров и времени перекидки клапанов.

**Практическая ценность результатов.** Усовершенствована расчетная методика для проектного теплового расчета насадки регенеративных горелок. На основе математической модели теплообменных процессов в регенеративной насадке разработано соответствующее программное обеспечение. Обоснованы рациональные параметры теплообменных насадок компактных регенеративных горелок. Установлены рациональные диапазоны основных конструктивных и

технологических параметров, такие как скорость теплоносителя и отношение высоты засыпки к диаметру насадки, являются основой для проектирования отечественных компактных регенеративных горелок и их успешного внедрения на печных агрегатах с получением значительной экономии топлива. Определены основные конструктивные параметры линейки мощностей регенеративных горелок.

Результаты исследования приняты на НПО «Ясиноватский машиностроительный завод» для определения параметров насадок регенеративных горелок для отопления печей кузнечно-прессового цеха и внедрены в учебный процесс кафедры технической теплофизики ФГБОУ ВО «ДонНТУ» в рамках дисциплины «Высокотемпературные теплотехнологические процессы и установки».

**Методология и методы исследования.** Работа выполнена на основе методологии системного подхода, предполагающего рациональное сочетание теоретических и экспериментальных методов исследования. В качестве основного метода исследования теплообменных процессов в компактной насадке регенеративной горелки разработана математическая модель, рассматривающая тепловые балансы условно выделенных слоев по высоте насадки и учитывающая термические характеристики теплоаккумулирующих шариков, образующих насадку, за счет решения дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности. Верификация математической модели проведена при помощи специально разработанной экспериментальной установки, имитирующей «дымовую» фазу работы регенеративной горелки. Установленные при помощи математической модели закономерности изменения величин, характеризующих тепловую работу насадки, использованы для совершенствования расчетных методик, что позволило с их помощью уточнить значения рациональных параметров компактных насадок регенеративных горелок. На всех этапах исследования для аппроксимации результатов и подтверждения адекватности полученных зависимостей использовались методы математической статистики.

#### **Положения, выносимые на защиту.**

1. Обосновано, что температура продуктов сгорания на выходе из компактной насадки регенеративной горелки меняется во времени по логарифмической зависимости  $t_d(\tau) = t_d^{\min} + (t_d^{\text{печь}} - t_d^{\min})^{k_d} \cdot \ln(\tau)$ . Установлена зависимость параметра этой зависимости  $k_d$  от безразмерных комплексов, характеризующих процесс.

2. Показано, что наиболее эффективное для получения максимальной величины коэффициента использования топлива значение времени переключения клапанов регенеративных горелок находятся в диапазоне 20...95 секунд и обоснованы рациональные конструктивные и технологические параметры насадок. Для конструктивного параметра насадки, отношения высоты засыпки теплоаккумулирующего материала к диаметру насадки  $H/D$ , обоснован рациональный диапазон 1,35...2,60.

**Степень достоверности и апробация результатов диссертации.** Достоверность полученных в диссертации научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается корректностью поставленных задач, достаточным

объемом аналитических исследований, достаточным уровнем согласованности результатов экспериментальных и теоретических исследований. Математическая модель верифицирована при помощи проведения экспериментов на специально созданной лабораторной установке, имитирующей «дымовую фазу работы регенеративной горелки», расхождения расчетных и экспериментальных данных не превышает 5%.

**Личный вклад соискателя.** Диссертантом лично разработана и создана экспериментальная установка для изучения теплообменных процессов в шариковой насадке компактной регенеративной горелки; разработана математическая модель работы насадки компактной регенеративной горелки, доказана ее адекватность путем сравнения результатов с литературными данными и результатами, полученными в процессе проведения эксперимента; установлена зависимость изменения температуры продуктов сгорания на выходе из насадки; уточнены значения оптимального времени перекидки клапанов и определены рациональные конструктивные и технологические параметры работы регенеративных горелок.

**Публикации.** Основные результаты диссертационных исследований изложены в 14 печатных работах, из них 6 – в рецензируемых научных изданиях, включая 3 работы в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов, утвержденных ВАК РФ (3 соответствуют категории К2); 8 – в материалах конференций.

**Соответствие темы и содержания диссертации паспорту научной специальности.** Тема и содержание диссертации «Обоснование рациональных параметров теплообменных насадок компактных регенеративных горелок» на соискание ученой степени кандидата технических наук соответствует паспорту научной специальности 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника (технические науки), в частности: п. 5. «Научные основы и методы интенсификации процессов тепло- и массообмена и тепловой защиты. Процессы тепло- и массообмена в оборудовании, предназначенном для производства, преобразования, передачи и потребления теплоты», п. 6. «Научные основы повышения эффективности использования энергетических ресурсов в теплотехническом оборудовании и использующих теплоту системах и установках», п. 9 «Системы обеспечения теплового режима теплоэнергетических, промышленных и коммунальных объектов, теплопотребляющего и тепловыделяющего оборудования, методы их совершенствования. Математическое моделирование и оптимизация энерготехнологических систем промышленных предприятий и систем теплоснабжения зданий, районов и городов» и п. 10 «Теоретические аспекты и методы интенсивного энергосбережения в тепловых технологических системах и процессах. Теоретические основы создания малоотходных и безотходных тепловых технологических установок, способствующих защите окружающей среды».

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа содержит 126 страниц машинописного текста и состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка литературы из 108 источников на 14 страницах, 3 приложений, иллюстрируется 26 рисунками и содержит 15 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновано состояние проблемы, отмечена актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследования, приведена научная и практическая новизна полученных результатов, сведения об апробации проведенных исследований и публикации научных статей.

**В первом разделе** на основании отечественных и зарубежных источников выполнен анализ известных научных и технических решений в области определения и совершенствования параметров регенеративных горелок. Рассмотрены общие вопросы работы регенеративных горелок, результаты научных исследований, посвященных различным аспектам работы регенеративных горелок.

Показано, что в настоящее время наиболее распространенным методом исследования теплообменных процессов в теплообменных насадках регенеративных горелок является метод математического моделирования. Проанализированы наиболее характерные из известных математических моделей, выявлены их достоинства и недостатки. Рассмотрено состояние вопроса, связанного с разработкой и использованием расчетных методик для определения конструктивных и технологических параметров теплообменных насадок регенеративных горелок. Это позволило сделать вывод о том, что именно отсутствие универсального математического аппарата является наиболее проблемным и актуальным при проектировании таких устройств.

На основании выполненного анализа состояния вопросов, связанных с исследованием теплообменных процессов в насадках регенеративных горелок и определением их технологических и конструктивных параметров, сформулированы цель и задачи исследований в диссертационной работе.

**Во втором разделе** отражены методологические основы проведения научных исследований, направленных на решение поставленных в диссертации задач.

Разработана математическая модель теплообменных процессов в шариковой насадке компактной регенеративной горелки, основанная на рассмотрении тепловых балансов слоев, выделенных по высоте насадки, и позволяющая учесть термическую массивность тел, образующих насадку, за счет решения дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности для шариков каждого слоя.

Для реализации принятого подхода насадка по высоте разбивается на  $n$  слоев одинаковой толщины  $\Delta h$ , а время дискретизируется с шагом  $\Delta t$ .

В течение времени  $\Delta t$  производится расчет количества теплоты, передаваемого от горячего теплоносителя теплоаккумулирующим шарикам. Эта задача решается для каждого из слоев в каждый узловой момент времени, выделенный в течение «дымовой» и «воздушной» фаз.

Количество теплоты, передаваемое от горячего теплоносителя теплоаккумулирующим шарикам на произвольном  $i$ -ом слое в момент времени  $k+1$ , рассчитывается по формуле:

$$\Delta Q_{i,k+1} = \alpha_{v_{i,k}} \cdot \Delta h \cdot f \cdot \Delta \tau \left( U_{i-1,k}^D - t_{i,k} \right) - \frac{2\pi (t_{i,k} - t_{окр})}{\frac{1}{\alpha_{i,k} r_1} + \frac{1}{\lambda} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\alpha_{окр} r_2}} \Delta h \cdot \Delta \tau, \text{ Дж.} \quad (1)$$

Количество теплоты, которое шарики передают холодному теплоносителю на произвольном  $i$ -ом слое в момент времени  $k+1$ , определяется как:

$$\Delta Q_{i,k+1} = \alpha_{v,i,k} \cdot \Delta h \cdot f \cdot \Delta \tau (t_{i,k} - U_{i-1,k}^B) - \frac{2\pi(t_{i,k} - t_{окр})}{\frac{1}{\alpha_{i,k} r_1} + \frac{1}{\lambda \ln \frac{r_2}{r_1}} + \frac{1}{\alpha_{окр} r_2}} \Delta h \cdot \Delta \tau, \text{ Дж}, \quad (2)$$

где  $\alpha_{v,i,k}$  – объемный коэффициент конвективной теплоотдачи в слое шариков, определяемый по эмпирической формуле Китаева-Фурнаса, Вт/(м<sup>3</sup>·К);  $f$  – поперечное сечение шариковой насадки, м<sup>2</sup>;  $U_{i-1,k}$  – температура теплоносителя на предыдущем шаге по координате и  $k$ -том шаге по времени °С;  $t_{i,k}$  – температура поверхности теплоаккумулятора (шариков насадки) на  $i$ -том шаге по координате и  $k$ -том шаге по времени, °С;  $t_{окр}$  – температура окружающей среды, °С;  $\alpha_{i,k}$  – коэффициент конвективной теплоотдачи на внутренней поверхности ограждающих конструкций, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\alpha_{окр}$  – коэффициент теплоотдачи от поверхности корпуса насадки к окружающей среде, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности теплоизоляционного материала на корпусе насадки Вт/(м·К);  $r_1, r_2$  – внутренний и внешний радиусы слоя теплоизоляции на корпусе насадки, м.

Расчет температуры дыма на выходе из  $i$ -го слоя производится по формуле:

$$U_{i,k}^D = U_{i-1,k}^D - \frac{\Delta Q_{i,k}}{V_D \cdot c_{дым} \Delta \tau}, \text{ °С} \quad (3)$$

где  $U_{i,k}^D$  – температура дыма, °С;  $c_{дым}$  – теплоемкость дыма, Дж/(м<sup>3</sup>·К).

Расчет температуры воздуха на выходе из  $i$ -го слоя производится по формуле:

$$U_{i,k}^B = U_{i-1,k}^B + \frac{\Delta Q_{i,k}}{V_0 \cdot c_B \Delta \tau}, \text{ °С} \quad (4)$$

где  $U_{i,k}^B$  – температура воздуха, °С;  $c_B$  – теплоемкость воздуха, Дж/(м<sup>3</sup>·К).

Исследование температурного состояния шариков производится путем решения дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности в сферической системе координат для шариков на каждом выделенном для рассмотрения слое по высоте насадки:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_{эф}} \left( \frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial t}{\partial r} \right) \quad (5)$$

где  $r$  – радиус теплоаккумулирующего шарика.

В математической модели реализовано решение данного уравнения численным методом с использованием явной схемы аппроксимации. Для точки в центре шарика принимаются граничные условия второго рода,  $\frac{\partial t}{\partial r} = 0$ . Для точки на поверхности шарика задаются граничные условия третьего рода,  $-\lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial m} \Big|_{m=0} = \alpha \cdot (t_{ср} - t_{пов})$ , где  $t_{ср}$  – температура среды, окружающей шарик, °С;  $t_{пов}$  – температура поверхности шарика, °С.

Для расчета на радиусе шарика выделяется  $m$  контрольных точек, находящихся на одинаковом расстоянии друг от друга:  $\Delta r = R/(m - 1)$ , м, где  $R$  –

это радиус теплоаккумулирующего шарика. После аппроксимации дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности и граничных условий получены следующие расчетные выражения для определения температур узловых точек, выделенных на радиусе шарика:

- для поверхности

$$t_{i,k}^1 = \frac{U_{i-1,k}^{cp} \cdot \alpha + \frac{\lambda \cdot t_{i,k-1}^1}{\Delta r}}{\alpha + \frac{\lambda}{\Delta r}}, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (6)$$

- для точек от 2 до m-1

$$t_{i,k}^j = t_{i,k-1}^j + \frac{\lambda \Delta \tau}{\rho c} \left( \frac{t_{i,k-1}^{j+1} - 2t_{i,k-1}^j + t_{i,k-1}^{j-1}}{\Delta r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{t_{i,k-1}^{j+1} - t_{i,k-1}^j}{\Delta r} \right), \text{ } ^\circ\text{C} \quad (7)$$

- температуру центра считаем равной температуре предыдущей точки m-1

$$t_{i,k}^m = t_{i,k}^{m-1}, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (8)$$

После расчета температур шарика в контрольных точках производится расчет среднемассовой температуры шарика. Принимается, что все шарики i-го слоя имеют одинаковую температуру.

В разделе представлены данные о способе решения задачи обработки результатов численных экспериментов для установления зависимости параметра, характеризующего изменение температуры продуктов сгорания на выходе из насадки, от критериев подобия, определяющих теплообменные процессы в данном устройстве.

Для подтверждения достоверности разработанной математической модели на кафедре «Техническая теплофизика» ДонНТУ была создана лабораторная установка, имитирующая «дымовую» фазу работы регенеративной горелки.

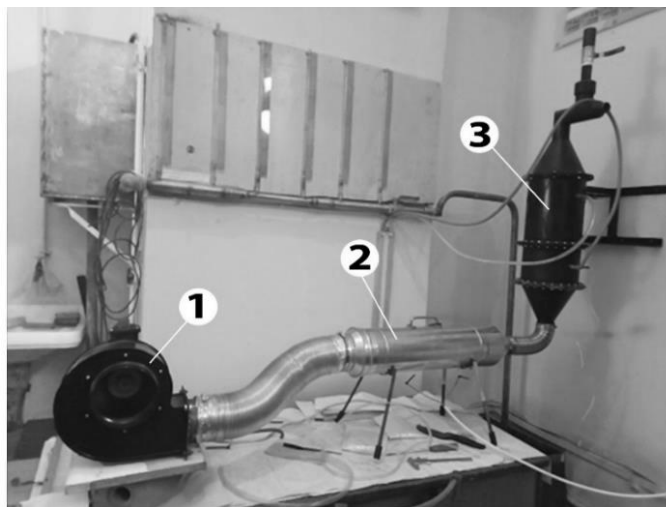


Рисунок 1 – Лабораторная установка шариковой регенеративной насадки:  
1 – нагнетатель; 2 – нагревательная труба (обогреваемая эклектическими спиралями); 3 – шариковая насадка

Экспериментально установлена скорость потока, отнесенная к внутреннему сечению корпуса 3 м/с. Нагревательная труба состоит из металлического кожуха и двух электрических спиралей общей мощностью 3,5 кВт. Лабораторная шариковая насадка имеет внутренний диаметр корпуса 200 мм, сетку, расположенную на некотором расстоянии от основания, на которую засыпаны стеклянные шарики. Высота засыпки шариков 137 мм. Средний диаметр шариков определялся посредством измерений при помощи штангенциркуля, по совокупности измерений был определен средний диаметр шариков. Он составил 20,99 мм. Через слой стеклянных шариков пропускали нагретый воздух и в непрерывном режиме отслеживали изменение температуры воздуха при помощи термопар и корпуса насадки при помощи тепловизора.

**В третьем разделе** представлены результаты исследования теплообменных процессов в насадках регенеративных горелок. Для подтверждения адекватности результатов расчета математической модели были проведены эксперименты на созданной лабораторной установке. Результаты измерений температуры воздуха регистрировались в ручном режиме с одинаковым интервалом по времени.

Для ввода в математическую модель значений температур греющего теплоносителя, соответствующих условиям проведения физического эксперимента, закономерность их изменения во времени была аппроксимирована при помощи полиномиального уравнения второго порядка  $t = -0,0737\tau^2 + 5,6349\tau + 11,84$  с коэффициентом детерминации полученной зависимости  $R^2=0,9926$ .

Полученные результаты приведены на рисунке 2, где представлены экспериментальные данные (1 и 2), аппроксимированная зависимость изменения температуры на входе в установку (3) и данные о температуре среды на выходе из насадки (4), полученные при помощи разработанной математической модели.

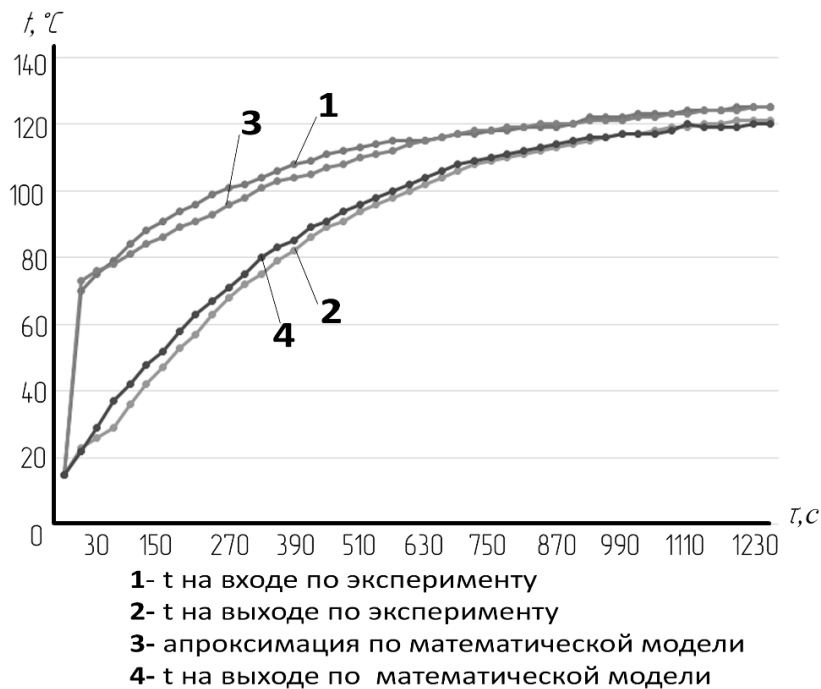


Рисунок 2 – Графики изменения температуры во времени: полученные экспериментально и полученные при помощи математической модели

После сопоставления линии 2 и 4 видно, что математическая модель позволяет с достаточной точностью определять температуру среды на выходе из насадки, при этом расхождение данных менее 5%, что позволяет сделать вывод об адекватности разработанной математической модели.

В разделе представлена проверка гипотез, высказанных А.Б. Бирюковым при составлении основ расчетной методики для расчета теплообменных процессов в насадках регенеративных горелок, согласно которым на выходе из насадки температуры газообразных сред во времени изменяются по экспоненциальным законам:

$$- \text{ для продуктов сгорания } t_d(\tau) = t_d^{\min} + (t_d^{\text{нач}} - t_d^{\min}) \cdot (1 - \exp(-k_d \cdot \tau))$$

$$- \text{ для воздуха } t_{\text{воз}}^{\min} = t_{\text{воз}}^{\max} \cdot \exp(-k_b \cdot \tau)$$

где  $t_d^{\min}$  и  $t_{\text{воз}}^{\max}$  – минимальная температура дыма и максимальная температура воздуха на выходе из насадки в начале газовой и воздушной фаз соответственно, °С;  $k_d, k_b$  – константы, характеризующие изменение температур дыма и воздуха;  $t_d^{\text{нач}}$  – температуры дымовых газов, покидающих печную камеру, °С;  $t_{\text{воз}}^{\min}$  – начальная температура воздуха, поступающего в теплоаккумулирующую насадку, °С;  $\tau$  – время, с;  $t_d(\tau)$  – температура дыма, выходящего из насадки, в произвольный момент в течение газовой фазы, °С;  $t_b(\tau)$  – температура воздуха, покидающего насадку, в произвольный момент в течение воздушной фазы, °С.

Для проверки при помощи математической модели проведен ряд экспериментов. В качестве исходных данных для расчета использовались усредненные данные работы промышленной печи с регенеративными горелками. Начальная температура дыма  $t_d^{\text{нач}} = 1000^\circ\text{C}$ ; расход дыма  $V_d = 6 \text{ м}^3/\text{с}$ ; начальная температура воздуха  $t_b^{\text{нач}} = 20^\circ\text{C}$ ; расход воздуха  $V_b = 5 \text{ м}^3/\text{с}$ ; высота насадки  $H = 0,223 \text{ м}$ ; диаметр шариков  $d = 0,02 \text{ м}$ ; материал теплоаккумулирующих шариков – корунд; теплоемкость материала шариков  $2300 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ; плотность шариков  $4000 \text{ кг}/\text{м}^3$ ; коэффициент теплопроводности материала шариков  $1,4 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ . Результаты расчета представлены на рисунках 3 и 4.

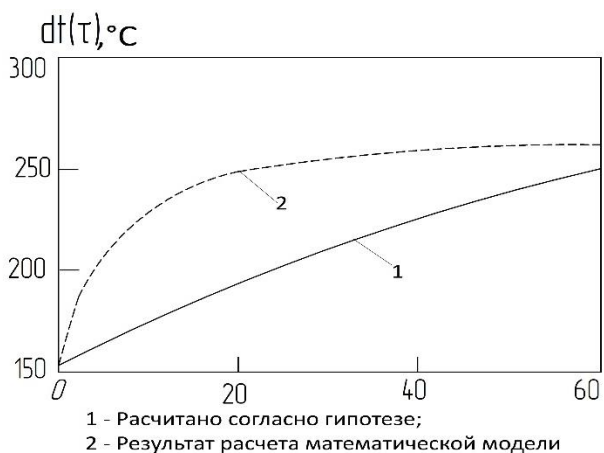


Рисунок 3 – Изменение температуры продуктов сгорания в цикле нагрева

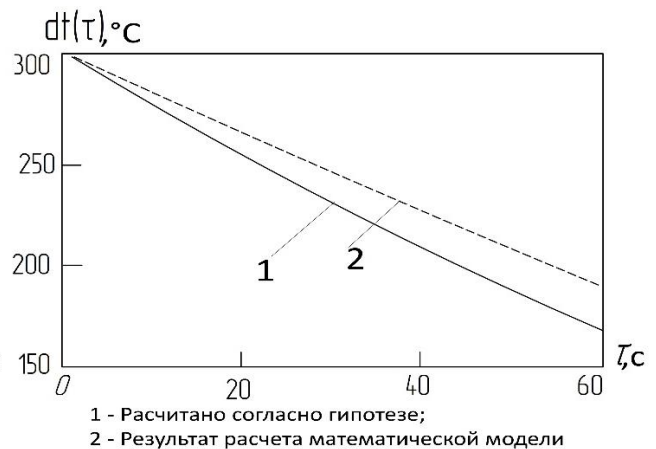


Рисунок 4 – Изменение температуры воздуха в цикле охлаждения

Сравнив графики на рисунке 4, можно сделать вывод, что гипотеза по поводу зависимости изменения температуры воздуха верна, графики качественно идентичны. Отличие минимальных значений температуры воздуха обусловлено различным значением принятого коэффициента  $k_b$ . Полученные результаты имеют коэффициент детерминации  $R^2=0,9845$ , что свидетельствует о достоверности полученных результатов.

Графики на рисунке 3 существенно отличаются друг от друга. Предложенная зависимость для определения температуры продуктов сгорания не соответствует полученной в процессе моделирования, что говорит о необходимости дальнейших исследований.

Для описания изменения температуры продуктов сгорания в цикле нагрева была выбрана логарифмическая зависимость, которая качественно правильно повторяет линию изменения температуры продуктов сгорания математической модели в период нагрева насадки, с коэффициентом детерминации  $R^2=0,9961$ . Для анализа выбирались результаты, соответствующие установившемуся режиму работы насадки.

$$t_d(\tau) = t_d^{\min} + (t_d^{\text{нечб}} - t_d^{\min}) k_d \cdot \ln(\tau). \quad (9)$$

В процессе исследований принято решение рассмотреть зависимость параметра  $k_d$  от четырех критериев подобия: критерия Рейнольдса ( $Re$ ); критерия Био ( $Bi$ ); критерия  $W$ , равного отношению водяного числа продуктов сгорания к кажущемуся водяному числу насадки (отношение полной теплоемкости насадки к продолжительности «дымовой» фазы); критерия  $H/D$ , отражающего влияние высоты слоя засыпки шариков.

Таким образом, рассмотрен следующий вид искомой зависимости:

$$k_d = a Re^{b_1} Bi^{b_2} W^{b_3} \left( \frac{H}{D} \right)^{b_4}. \quad (10)$$

Для установления искомой зависимости параметра  $k_d$  от выбранных критериев подобия исследование было проведено согласно методике планирования эксперимента. Был выбран диапазон значений критериев, указанный в таблице 1.

Таблица 1 – Значения факторов, выбранные для факторного эксперимента

Фактор	Минимальное значение	Среднее значение	Максимальное значение
x1	$\ln Re = 7,501$	$\ln Re = 8,305$	$\ln Re = 9,11$
x2	$\ln Bi = -0,51$	$\ln Bi = 0,161$	$\ln Bi = 0,832$
x3	$\ln W = -1,609$	$\ln W = -1,406$	$\ln W = -1,203$
x4	$\ln H/D = -0,693$	$\ln H/D = 0,202$	$\ln H/D = 1,098$

Для линеаризации задачи проведено логарифмирование левой и правой частей выражения:

$$\ln k_d = \ln a + b_1 \ln Re + b_2 \ln Bi + b_3 \ln W + b_4 \ln \left( \frac{H}{D} \right). \quad (11)$$

Для получения значений коэффициентов в натуральном виде проведена процедура декодирования, что дало возможность записать рассматриваемое критериальное уравнение в следующем виде:

$$k_d = 9,091 \cdot \text{Re}^{-0,33} \cdot \text{Bi}^{0,02} \cdot W^{0,25} \cdot \left(\frac{H}{D}\right)^{0,26}. \quad (12)$$

После анализа полученного результата, была проведена проверка значимости каждого из полученных критериев. Результатом проверки стал вывод, что влияние критерия  $Bi$  на значение  $k_d$  существенно меньше, чем для остальных критериев, и его можно признать незначимым. Итоговое критериальное уравнение приобрело вид:

$$k_d = 9,15 \cdot \text{Re}^{-0,33} \cdot W^{0,25} \cdot \left(\frac{H}{D}\right)^{0,26}. \quad (13)$$

Иллюстрация сопоставления изменения температур продуктов сгорания после насадки, полученных при помощи математической модели, а также в соответствии в критериальным уравнением для  $k_d$  по логарифмической зависимости, представлена на рисунке 5.

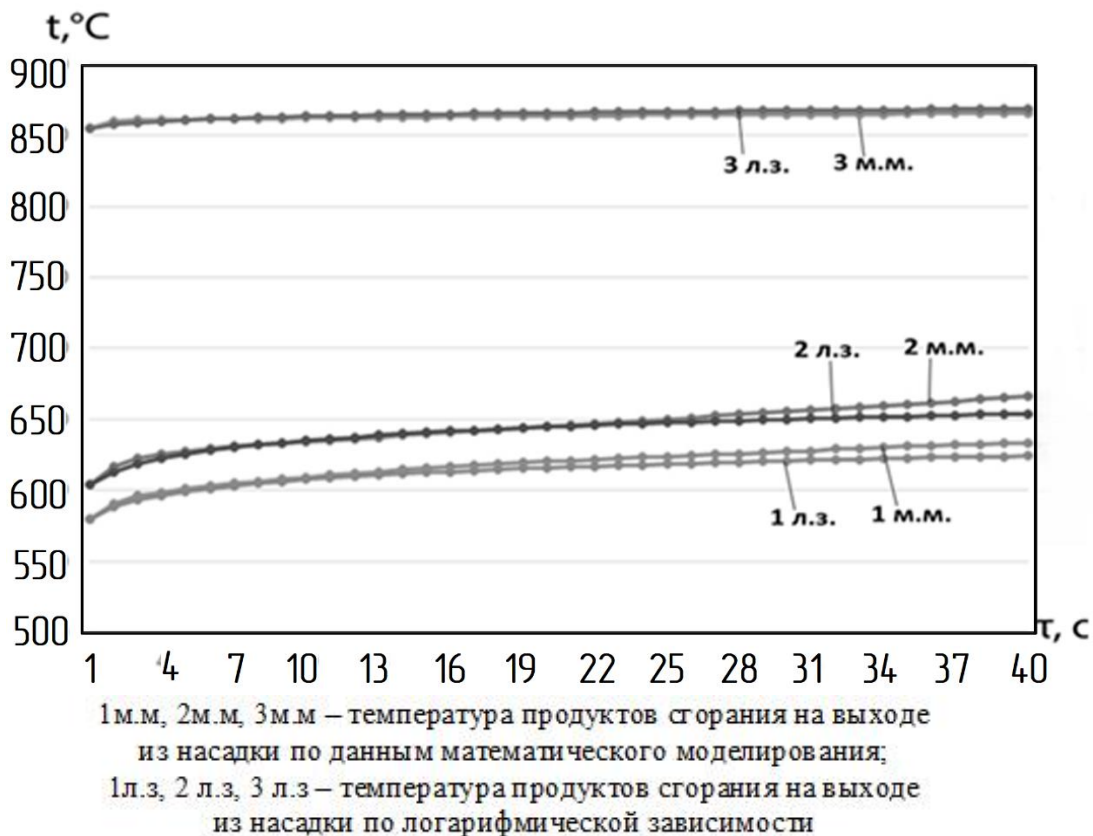
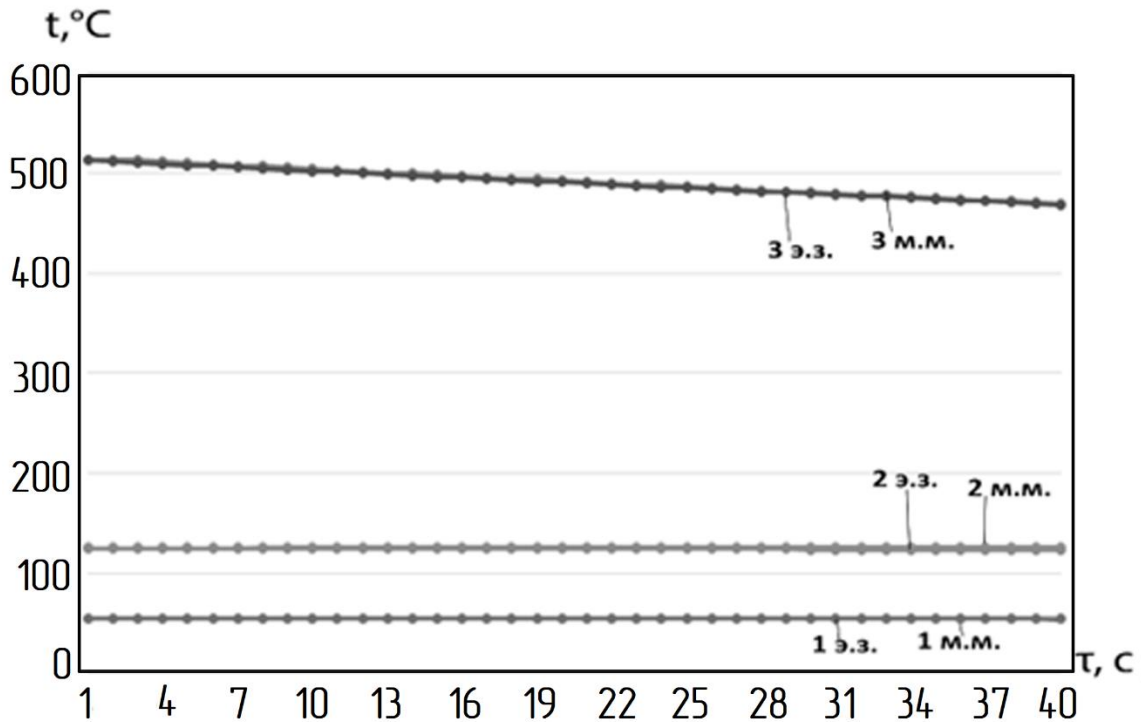


Рисунок 5 – Сравнительный анализ данных изменения температуры дыма после насадки по математической модели и по логарифмической зависимости

Для поиска критериального уравнения для определения значения коэффициента  $k_v$  были выполнены по аналогии все вышеперечисленные действия. Для этого были выбраны три оставшиеся критерия подобия. Для них были приняты те же значения максимума и минимума, что и в предыдущем полнофакторном эксперименте. В результате было получено уравнение

$$k_b = -7,93 \cdot \text{Re}^{-0,07} \cdot W^{0,89} \cdot \left(\frac{H}{D}\right)^{0,88} \quad (14)$$

Для проверки полученных результатов на рисунке 6 построено 6 линий для 3 наборов данных, сопоставляются изменения температур воздуха после насадки, полученных при помощи математической модели и согласно критериальному уравнению для  $k_b$  по экспоненциальной зависимости. Линии, соответствующие одному набору исходных данных, практически полностью совпадают, что свидетельствует о высоком качестве аппроксимации.



1 м.м., 2 м.м., 3 м.м. – температура продуктов сгорания на выходе из насадки по данным математического моделирования;  
1 л.з., 2 л.з., 3 л.з. – температура продуктов сгорания на выходе из насадки по логарифмической зависимости

Рисунок 6 – Сравнительный анализ данных изменения температуры воздуха после насадки по математической модели и по экспоненциальной зависимости

При помощи математической модели был проведен расчет регенеративных горелок мощностью 100 кВт для шести значений высоты засыпки: 400, 500, 600, 700, 800 и 900 мм. Остальные данные для расчета: длительность одной фазы (время перекидки клапанов)  $\tau = 25$  с, температура печи  $t_d^{\text{печь}} = 1250^\circ\text{C}$ , диаметр шариков  $d = 20$  мм, свойства теплоаккумулирующего материала  $\rho_m = 2300 \text{ кг/м}^3$ ,  $c_m = 1000 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}$ . На рисунке 7 показаны полученные температурные поля.

Расчитанные при помощи математической модели значения температурных напоров  $\Delta t_{1,cl}^{н.ф}, \Delta t_{1,cl}^{к.ф}, \Delta t_{n,cl}^{н.ф}, \Delta t_{n,cl}^{к.ф}$  для шариковой насадки регенеративной горелки мощностью 100 кВт для разной высоты засыпки теплоаккумулирующих шариков в насадке представлены в таблице 2.

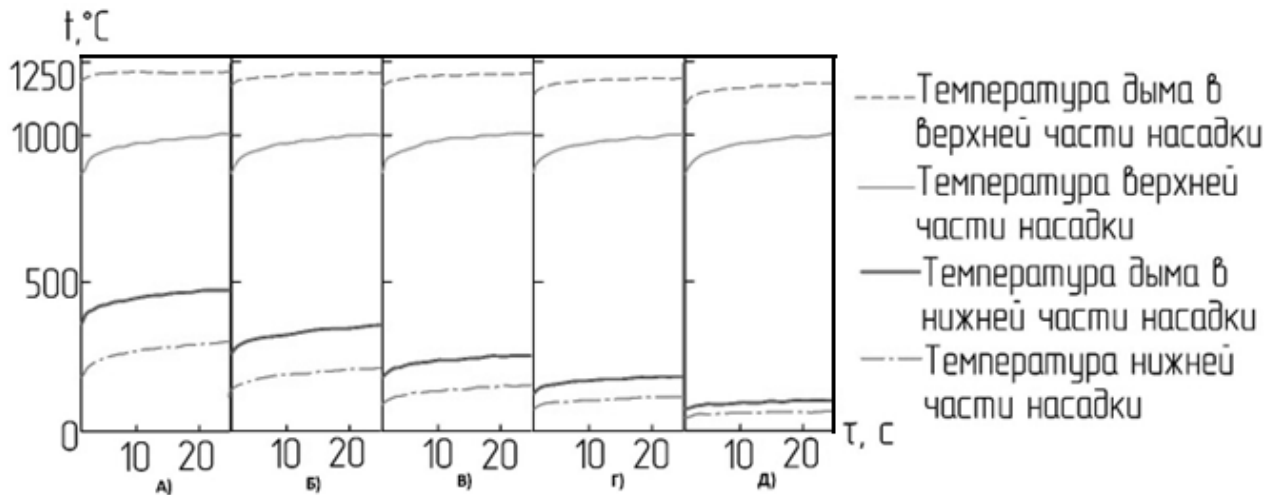


Рисунок 7 – Изменение температуры для насадки с высотой засыпки а) 0,4 м; б) 0,5 м; в) 0,7 м; г) 0,8 м; д) 0,9 м.

Таблица 2 – Данные о температуре насадки и продуктов сгорания в верхней и нижней части насадки

Высота засыпки шариков, мм	Верхняя часть насадки						Нижняя часть насадки					
	Начало фазы			Конец фазы			Начало фазы			Конец фазы		
	$t_{\text{нас}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{дым}}, ^\circ\text{C}$	$\Delta t_{\text{исл}}^{\text{н.ф}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{нас}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{дым}}, ^\circ\text{C}$	$\Delta t_{\text{исл}}^{\text{к.ф}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{нас}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{дым}}, ^\circ\text{C}$	$\Delta t_{\text{исл}}^{\text{н.ф}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{нас}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{дым}}, ^\circ\text{C}$	$\Delta t_{\text{исл}}^{\text{к.ф}}, ^\circ\text{C}$
400	916	1207	291	1000	1219	219	170	475	305	270	480	210
500	916	1196	280	1000	1205	205	130	362	232	208	368	160
600	916	1185	269	1000	1202	202	97	263	166	147	268	121
700	916	1173	257	1000	1193	193	70	187	117	105	191	86
800	916	1156	240	1000	1184	184	57	133	76	68	136	68
900	916	1142	226	1000	1174	174	43	95	52	58	97	39

Использование этих результатов для обратного расчета горелок по уточненной расчетной методике показало, что рассчитанные значения высоты засыпки ни для одного из случаев не соответствуют исходным значениям, использованным при математическом моделировании.

Для достижения совпадения высоты и других параметров засыпки, полученных при помощи расчетной методики, со значениями, заданными в качестве исходных данных в математическую модель, принято решение определять действующее значение температурного напора между продуктами сгорания и материалом насадки по формуле  $\Delta t_{\text{д}} = b \cdot \Delta \bar{t}$ , где  $\Delta \bar{t}$  – среднеарифметическое значение температурного напора между продуктами сгорания и насадкой;  $b$  – поправочный коэффициент.

Для достижения достаточной степени достоверности в методику вводится поправочный коэффициент  $b$ , позволяющий учесть отклонение действующего значения температурного напора от среднего арифметического. Определение значения этого коэффициента проводилось методом начальной подстройки, позволяющей достигнуть одинаковых результатов (высоты засыпки) при расчете по

математической модели и расчетной методике. Анализ полученных результатов позволил выявить квадратичную закономерность изменения коэффициента  $b = 0,0002\Delta\bar{t}^2 - 0,045\Delta\bar{t} + 3,657$  в зависимости от среднеарифметического температурного напора насадки ( $\Delta\bar{t}$ ) с высокой достоверностью  $R^2=0,97$ .

Результаты определения коэффициента  $b$  представлены на рисунке 8.

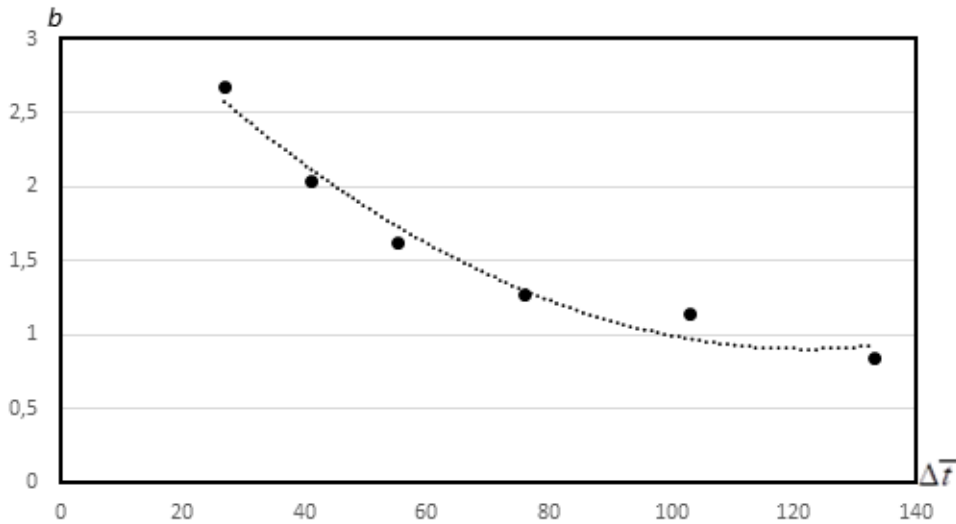


Рисунок 8 – Зависимость поправочного коэффициента  $b$  от  $\Delta\bar{t}$

**В четвертом разделе** рассмотрены вопросы определения времени перекидки клапанов, определения конструктивных размеров шариковой регенеративной насадки и оценки экономического эффекта от внедрения регенеративных горелок на производстве.

Для проведения расчетов по уточненной методике для определения коэффициента использования топлива (КИТ) и сравнения с результатами, полученными по ранее принятой методике, были использованы следующие исходные данные. Условный состав топлива – 100 %  $CH_4$ ; коэффициент расхода воздуха 1,1;  $t_{\text{воз}}^{\text{max}}=1100^\circ\text{C}$ ;  $t_{\text{д}}^{\text{min}}=300^\circ\text{C}$ ;  $t_{\text{д}}^{\text{печь}}=1300^\circ\text{C}$ ;  $V_{\text{T}}=0,028 \text{ м}^3/\text{с}$ ;  $t_{\text{воз}}=30^\circ\text{C}$ ; коэффициент, учитывающий понижение температуры воздуха  $\chi=0,7$ . На основании расчета процесса горения топлива установлен удельный выход продуктов сгорания  $11,71 \text{ м}^3/\text{м}^3$ . Остальные исходные данные перечислены в таблице 3.

Таблица 3 – Исходные данные для расчета КИТ печной системы с регенеративными горелками

Вариант	I	II	III	IV
Свободный объем насадки регенератора, $V_{\text{сбр}}, \text{ м}^3$	0,05	0,1	0,1	0,1
Объем продуктов сгорания при нормальных условиях сбрасываемых из печи при каждой смене фаз, $V_{\text{св.о}}^p, \text{ м}^3$	0	0	0,1	0,5

Проанализировав графики на рисунке 9, можно наблюдать, насколько значимым является количество продуктов сгорания сбрасываемых из печи при каждой перекидке клапанов ( $V_{сбр}$ ), и что влияние свободного объема насадки регенератора ( $V_{св.0}^P$ ) имеет место, однако в количественном соотношении оно меньше, чем влияние  $V_{сбр}$ .

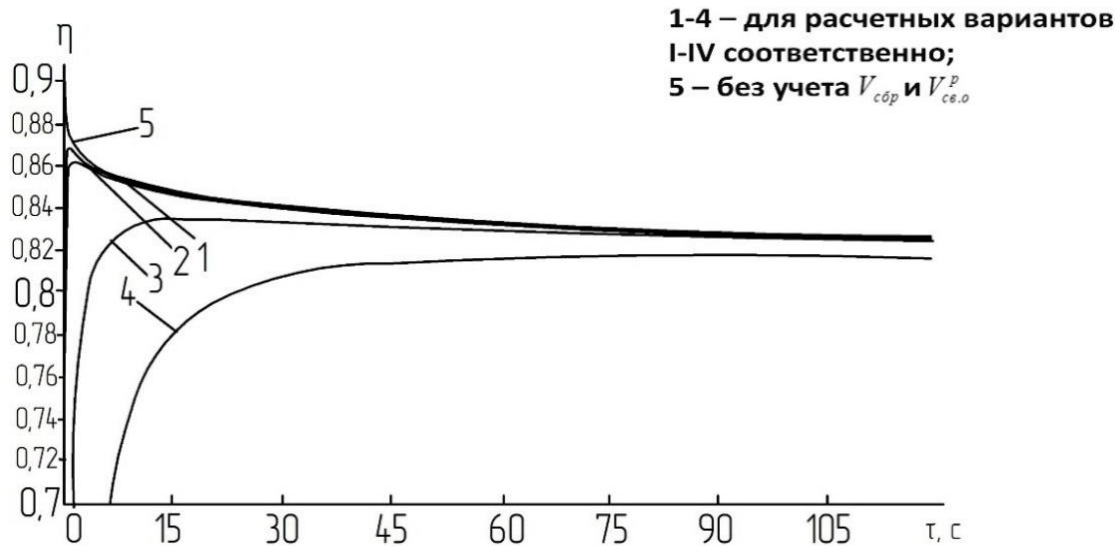


Рисунок 9 – Зависимость КИТ печной системы на базе регенеративных горелок от периода перекидки клапанов

Для каждого из вариантов с I по IV функция КИТ была продифференцирована по периоду перекидки клапанов. Значения  $\tau_{опт}$ , при которых производные равны 0, соответствуют оптимальным значениям периода перекидки клапанов для каждого из вариантов. Полученные значения  $\tau_{опт}$  и КИТ представлены в таблице 4.

Характер полученных кривых, соответствующих вариантам I-IV, свидетельствует о том, что объем продуктов сгорания при нормальных условиях сбрасываемых из печи при каждой смене фаз очень сильно влияет на КИТ системы, и чем он больше, тем сильнее замедляется рост КИТ на графике.

Таблица 4 – Результаты исследования базовых вариантов

Вариант	I	II	III	IV
Вариант расчета до внесения изменений				
Оптимальное время смены фаз, $\tau$ , с	2,4	3,35	12,1	26,7
Коэффициент использования топлива (КИТ), $\eta$	0,855	0,852	0,825	0,783
Вариант расчета после модернизации методики				
Оптимальное время смены фаз, $\tau$ , с	0,85	2	20,28	95
Коэффициент использования топлива (КИТ), $\eta$	0,867	0,857	0,83	0,813

Результаты, представленные в таблице 4, отображают оптимальное значение времени перекидки клапанов с точки зрения КИТ, однако на практике существует огромное количество прочих факторов, влияющих на время смены фаз, в частности,

ресурсы механизмов «перекидки клапанов». Исходя из существующего практического опыта, время смены фаз менее 20 с является нерациональным по отношению к механическому ресурсу механизмов.

На сайте производителя регенеративных горелок были взяты исходные данные для расчета шариковых теплообменных насадок для модельного ряда регенеративных горелок (таблица 5).

Таблица 5 – Модельный ряд горелок газовых регенеративных

Тип горелки	Мощность, кВт	Давление воздуха, Мбар
ГГР-10	380	6,2
ГГР-20	760	6,2
ГГР-30	1170	6,2
ГГР-40	1600	6,2

Остальные исходные данные были выбраны одинаковые для всех вариантов расчета: условный состав топлива – 100 %  $\text{CH}_4$ ; коэффициент расхода воздуха  $\alpha=1,12$ ;  $t_{\text{д}}^{\text{нечь}}=1250^{\circ}\text{C}$ ;  $t_{\text{д}}^{\text{мин}}=400^{\circ}\text{C}$ ;  $t_{\text{воз}}=30^{\circ}\text{C}$ ; теплоемкость материала насадки  $c=2300$  Дж/(кг·К); плотность шариков  $\rho=2300$  кг/м<sup>3</sup>; теплопроводность материала шариков  $\lambda=1$  Вт/(м·К).

Таблица 6 – Рассчитанные конструктивные параметры регенеративной насадки для модельного ряда газовых регенеративных горелок

Мощность, кВт	Скорость, м/с	Масса, кг	Диаметр, м	Высота засыпки, м
380	1,6	108	0,317	0,802
760	1,6	210	0,443	0,802
1170	1,6	332	0,556	0,802
1600	1,6	454	0,651	0,802
1600	1,23	576	0,742	0,781

Проведенные расчеты подтвердили адекватность используемой методики. Ключевым результатом является соответствие расчетных параметров (геометрических размеров и массы компактной насадки) данным, опубликованным в научной и технической литературе. Это свидетельствует о корректности выбранных допущений и алгоритмов расчета.

В ходе проведенных исследований были установлены логически обоснованные зависимости, демонстрирующие значительную степень взаимосвязи конструктивных параметров компактной насадки от температурного напора между продуктами сгорания и материалом насадки.

В то же время установлено, что влияние времени перекидки клапанов на конструктивные параметры насадки оказывается вторичным по сравнению с температурным напором. Это означает, что оптимизация времени перекидки может привести к улучшению динамических характеристик горелки, но не является первостепенным фактором при выборе базовых размеров насадки.

В результате исследования, нацеленного на поиск рациональных конструктивных и технологических параметров насадок компактных регенеративных горелок при помощи уточненной расчетной методики обосновано, что рациональная скорость теплоносителя находится в пределах 1,3...2,3 м/с, рациональное значение  $H/D=1,35...2,6$ .

Рассчитан возможный экономический эффект от применения систем регенеративного отопления на типовой большегрузной печи с выкатным подом с грузоподъемностью подины 120 т, применяемой в условиях машиностроительных предприятий, работающих с большими кузнечными слитками. Для рассмотренного случая экономия топлива составит около 2500 м<sup>3</sup>/цикл нагрева, ожидаемые капиталовложения для одной печи – 5,5 млн. рублей, срок окупаемости около 6 месяцев.

Также получен акт внедрения результатов диссертационного исследования в условиях НПО «Ясиноватский машиностроительный завод» с целью определения рациональных параметров регенеративных горелок для их дальнейшего проектирования и внедрения в условиях кузнечно-прессового цеха.

### Заключение

Диссертация является законченной научно-исследовательской работой, в которой решена актуальная научно-техническая задача, имеющая важное значение для повышения энергоэффективности высокотемпературных нагревательных печей, заключающаяся в определении рациональных конструктивных и технологических параметров теплообменной шариковой насадки компактной регенеративной горелки.

Основные научные результаты работы можно сформулировать следующим образом.

1. Выполнен анализ информации о распространении и применении регенеративных горелок, методах определения рациональных технологических и конструктивных параметров теплоаккумулирующих насадок регенеративных горелок. Установлено отсутствие общепринятой методики для определения данных параметров, что позволило сформулировать цель и задачи исследования.

2. Разработана математическая модель теплообменных процессов в теплоаккумулирующей насадке регенеративной горелки. Математическая модель базируется на построении тепловых балансов условно выделенных слоев по высоте компактной регенеративной насадки и решении дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности для учета термических свойств теплоаккумулирующих шариков. Адекватность математической модели подтверждена путем физического эксперимента на созданной для этой цели лабораторной установке, имитирующей работу «дымовой» фазы регенеративной горелки. В математическую модель введены все исходные данные физического эксперимента. Сравнение экспериментальных данных о температуре среды на выходе из насадки с результатами численного моделирования дало подтверждение адекватности математической модели, расхождение данных не превышает 5%.

3. Проверена достоверность известной расчетной методики и была установлена правильность выдвинутой в ней гипотезы о возможности

использования экспоненциальной зависимости для описания изменения температуры воздуха на выходе из насадки; опровергнута гипотеза о возможности использования экспоненциальной зависимости для описания изменения температуры продуктов сгорания на выходе из насадки. Обосновано, что эта закономерность может быть описана при помощи зависимости логарифмического типа.

4. С использованием метода планирования эксперимента проведен полнофакторный эксперимент для установления показателей степени при определяющих критериях для критериального уравнения, предназначенного для определения значения параметра  $k_d$  логарифмической зависимости, описывающей изменение температуры продуктов сгорания на выходе из насадки. Изначально рассмотрена задача с четырьмя определяющими критериями подобия, характеризующими процесс в теплообменной насадке (критерий Рейнольдса ( $Re$ ); критерий Био ( $Bi$ ); критерий  $W$ ; критерий  $H/D$ ). После проведения анализа значимости критериев, критерий Био ( $Bi$ ) был признан незначимым. Установлено аналогичное критериальное уравнение для определения значения параметра  $k_v$  экспоненциальной зависимости, описывающей изменение температуры воздуха на выходе из насадки.

5. Разработан метод идентификации значения температурного напора между продуктами сгорания и материалом насадки. Определение этой величины необходимо для использования в рамках расчетной методики. Установлено значение поправочного коэффициента к среднеарифметическому температурному напору, позволяющее достичь соответствия между результатами математического моделирования и расчета по расчетной методике для разных высот насадки. В результате получено аппроксимирующее выражение для поправочного коэффициента с высокой достоверностью  $R^2=0,97$ .

6. Усовершенствована методика расчета КИТ печной системы с отоплением регенеративными горелками. Значения оптимального с точки зрения максимизации КИТ времени перекидки клапанов, полученные по усовершенствованной методике, в 1,5...2,1 раза превышают значения, полученные по ранее принятой методике. Полученные результаты помогут определить рациональное время смены фаз с учетом конструктивных особенностей системы с регенеративным отоплением.

7. Рассчитаны конструктивные параметры компактных шариковых теплообменных насадок регенеративных горелок для модельного ряда одного из производителей. Диапазон мощностей модельного ряда 380...1600 кВт. Для скорости теплоносителя 1,6 м/с диапазон диаметров насадки составил 0,317...0,651 м, а массы материала насадки – 108...454 кг.

8. Выполнен анализ зависимостей конструктивных параметров компактной насадки от теплотехнологических условий работы, в частности, скорости потока газов. Получены логически обоснованные зависимости, демонстрирующие большую степень взаимосвязи конструктивных параметров от скорости потока и температурного напора между продуктами сгорания и материалом насадки. Влияние времени перекидки клапанов выражено в меньшей степени. На основании вышеперечисленного был сделан вывод, что рациональная скорость теплоносителя находится в пределах 1,2...2,3 м/с, рациональное значение  $H/D = 1,35...2,6$ .

9. Согласно оценочному расчету экономического эффекта при использовании регенеративных горелок на типовой большегрузной печи с выкатным подом с грузоподъемностью подины 120 т получена экономия природного газа около 2500 м<sup>3</sup>/цикл нагрева. Оценочный срок окупаемости внедрения регенеративных горелок составляет около 6 месяцев.

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

***Публикации в изданиях, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук:***

1. Начкебия, Н.С. Уточнение инженерной методики определения основных параметров шариковой теплообменной насадки регенеративной горелки / Н.С. Начкебия, А.Б. Бирюков // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2025. – № 4. – С. 226-231.

2. Бирюков, А.Б. Определение закона изменения температуры продуктов сгорания на выходе из регенеративной насадки / А.Б. Бирюков, Н.С. Начкебия // Промышленная энергетика. – 2025. – № 10. – С. 35-43.

3. Начкебия, Н.С. Моделирование температурного поля насадок регенеративных горелок / Н.С. Начкебия, А.Б. Бирюков, Я.Ю. Асламова // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2024. – № 4. – С. 234-241.

***Публикации в рецензируемых изданиях, учредителями которых являются образовательные организации высшего образования и научные организации, расположенные на территории Донецкой Народной Республики:***

4. Начкебия, Н.С. Анализ расчетных методов и математических моделей теплообменных процессов в насадках регенеративных горелок / Н.С. Начкебия, А.Б. Бирюков // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2023. – № 1. – С. 50-56.

***Публикации в прочих рецензируемых изданиях:***

5. Бирюков, А.Б. Определение оптимального времени перекидки клапанов компактных регенеративных горелок / Бирюков А.Б., Начкебия Н.С. // Энергетические системы. – 2025. – № 4. – С. 46-51.

6. Курбатов, Ю.Л. Методика теплового расчета шариковой регенеративной насадки / Ю.Л. Курбатов, А.Б. Бирюков, Н.С. Начкебия, Е.В. Новикова, Е.А. Пилипеев // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2018. – № 6 (1422). – С. 82-91.

***Научные работы и тезисы докладов в материалах конференций***

7. Начкебия, Н.С. Исследование теплообменных процессов в микрогенеративных насадках / Н.С. Начкебия, А.Б. Бирюков // В сборнике: Металлургия XXI столетия глазами молодых. Материалы VIII Международной научно-практической конференции молодых ученых и студентов. Донецк, 2022. – С. 157-159.

8. Начкебия, Н.С. Математическая модель теплообменных процессов, протекающих в насадке микрогенеративной горелки / А.Б. Бирюков, Н.С. Начкебия // В сборнике: Социально-экономические проблемы развития

муниципальных образований. Материалы XXVII Международной научно-практической конференции. Княгинино, 2022. – С. 123-126.

9. Начкебия, Н.С. Моделирование температурного поля насадок регенеративных горелок // В книге: Актуальные проблемы недропользования. Тезисы докладов участников XIX Международного форума-конкурса студентов и молодых ученых. Санкт-Петербургский горный университет. Санкт-Петербург, 2023. – С. 113-115.

10. Начкебия, Н.С. Исследование теплообменных процессов в микрогенеративных насадках регенеративных горелок // В книге: Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. Тезисы докладов Тридцатой международной научно-технической конференции студентов и аспирантов. Москва, 2024. – С. 760.

11. Начкебия, Н.С. Цифровой двойник теплообменных процессов микрогенеративных насадок регенеративных горелок / Н.С. Начкебия, А.Б. Бирюков // В сборнике: Энергетическая эффективность промышленных объектов и городской инженерной инфраструктуры. Сборник докладов всероссийской научно-практической конференции (школы семинара) Института энергоэффективности и водородных технологий "НИУ "МЭИ" - 2024. Санкт-Петербург, 2024. - С. 209-211.

12. Начкебия, Н.С. Диагностика температурного поля шариковой микрогенеративной насадки / Н.С. Начкебия, А.Б. Бирюков // В сборнике: Металлургия XXI столетия глазами молодых. Материалы Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых и студентов: сборник докладов. Донецк, 2024. – С. 209-210.

13. Начкебия, Н.С. Диагностика состояния насадки микрогенеративной горелки по данным расчета цифрового двойника // В книге: Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. Тезисы докладов Тридцать первой международной научно-технической студентов и аспирантов. Москва, 2025. – С. 1020.

14. Начкебия, Н.С. Цифровой двойник теплообменных процессов микрогенеративных насадок регенеративных горелок, проверка адекватности / Н.С. Начкебия // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (XXIII Бенардосовские чтения): Материалы Международной научно-технической конференции, посвященной 80-летию Российской атомной промышленности. В 3-х томах, Иваново, 29–31 мая 2025 года. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2025. – С. 275-278.