

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке и
коммерциализации

Федерального государственного
бюджетного образовательного
учреждения высшего образования
«Казанский государственный
энергетический университет»

И.В. Ившин

«01» 04 2026 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

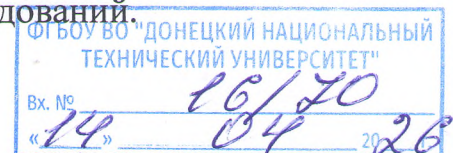
на диссертацию Начкебия Натальи Сергеевны на тему «Обоснование рациональных параметров теплообменных насадок компактных регенеративных горелок», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника (технические науки)

Диссертационная работа построена по классическому принципу и состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка литературы и приложений. Такая структура полностью соответствует логике проведенного исследования: от анализа проблемы через создание математического аппарата и его экспериментальную верификацию к разработке практических рекомендаций.

Содержание диссертации

Во введении обоснована актуальность темы, связанная с необходимостью повышения энергоэффективности высокотемпературных печных агрегатов за счет использования регенеративных горелок. Отмечено, что существующие методики расчета таких устройств зачастую базируются на подходах, разработанных для классических регенераторов, что не позволяет учитывать конструктивные особенности компактных насадок. Сформулированы цель и задачи работы, представлены научная новизна, практическая значимость и положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена аналитическому обзору научно-технической литературы. Рассмотрены известные исследования в области регенеративного подогрева. Выполнен анализ существующих математических моделей теплообменных процессов в насадках, выявлены их достоинства и ограничения. Показано, что большинство моделей ориентировано на стационарные или квазистационарные режимы, тогда как работа компактной регенеративной горелки характеризуется высокой динамикой. На основе проведенного анализа автором сделан обоснованный вывод об отсутствии универсальной расчетной методики, что позволило сформулировать цель и задачи последующих исследований.



Во второй главе изложены методологические основы работы. Ключевым элементом является разработанная автором математическая модель теплообмена в шариковой насадке. Модель построена на основе тепловых балансов элементарных слоев по высоте насадки с дискретизацией по времени. Особенность подхода заключается в совместном решении системы балансовых уравнений и дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности для шариков каждого слоя в сферических координатах. Для верификации модели создана экспериментальная установка, имитирующая «дымовую» фазу работы горелки. Подробно описаны конструкция установки, методика проведения экспериментов и обработки данных.

В третьей главе результаты теоретических и экспериментальных исследований. Подтверждена адекватность математической модели: расхождение расчетных и экспериментальных данных по температуре на выходе из насадки не превысило 5%. На основе численных экспериментов проведена проверка выдвинутых гипотез о характере изменения температур теплоносителей. Показано, что для температуры воздуха экспоненциальная зависимость справедлива, тогда как для продуктов сгорания она не подтвердилась. Установлено, что изменение температуры дыма подчиняется логарифмическому закону. С использованием методов планирования эксперимента получены критериальные уравнения для определения параметров логарифмической и экспоненциальной зависимостей. Кроме того, предложен метод идентификации действующего температурного напора через поправочный коэффициент, что позволило уточнить инженерную методику расчета.

В четвертой главе на основе уточненной методики проведена оптимизация времени переключения клапанов с точки зрения максимизации коэффициента использования топлива. Установлено, что рациональный диапазон времени перекидки составляет 20...95 секунд. Выполнены расчеты конструктивных параметров насадок для модельного ряда горелок мощностью от 380 до 1600 кВт. Определены рациональные значения скорости теплоносителя (1,2...2,3 м/с) и отношения высоты засыпки к диаметру насадки H/D (1,35...2,6). Приведена оценка экономической эффективности: для типовой печи с выкатным подом ожидаемая экономия природного газа составляет около 2500 м³ на цикл нагрева, а срок окупаемости - порядка 6 месяцев.

Актуальность темы исследования

Одним из наиболее перспективных путей развития современной промышленности – повышение энергоэффективности производственного оборудования. Особое внимание уделяется использованию регенеративного способа утилизации тепла продуктов сгорания высокотемпературных производственных процессов. Этот подход, имеет долгую и разнообразную

историю, и его применение становится все более важным в условиях современных производственных процессов.

Одним из наиболее перспективных решений в данной области является использование регенеративных горелок. Эти устройства представляют собой следующий этап в развитии регенеративных теплообменников. Применение компактных регенеративных горелок на производственных предприятиях позволяет значительно сократить расход топлива, что в свою очередь ведет к повышению энергоэффективности всего производственного процесса. Это особенно актуально для высокотемпературных производств, где оптимизация тепловых процессов может существенно повлиять на общие затраты.

Несмотря на явные преимущества регенеративных горелок по сравнению с традиционными системами отопления, их внедрение и распространение на практике сталкивается с определенными барьерами. Одним из основных факторов, тормозящих использование этих технологий, является отсутствие общедоступной и понятной методики для расчета необходимых параметров. В зависимости от специфики и потребностей конкретного технологического процесса требуется индивидуальный подход к расчету параметров теплообменных насадок, которые являются ключевыми элементами в работе регенеративных горелок.

На сегодняшний день большинство производителей регенеративных горелок находятся за пределами нашей страны, и, как правило, они не публикуют свои методики определения параметров теплообменных насадок в открытых источниках. Это создает дополнительные трудности для отечественных проектировщиков и инженеров, которые стремятся внедрить новые технологии в свои производственные процессы. Современные исследователи часто прибегают к математическому моделированию при изучении регенеративных горелок, однако этот подход не всегда способствует популяризации и практическому применению этих устройств.

Важным шагом к решению данной проблемы является разработка расчетной методики для регенеративных горелок. Такая методика упростит задачу проектировщиков, позволяя им более эффективно интегрировать регенеративные горелки в свои проекты. Это, в свою очередь, обеспечит возможность достижения высоких температур нагрева материалов, что является критически важным для многих производственных процессов.

В рамках диссертационной работы, выполненной Натальей Сергеевной Начкебия, рассматривается актуальная научно-техническая задача, связанная с обоснованием рациональных параметров теплообменной насадки для компактной регенеративной горелки. Разработанная методика позволяет определить необходимые параметры насадки, что обеспечивает достижение требуемых характеристик в процессе нагрева материалов. Это исследование имеет важное значение для повышения энергоэффективности и конкурентоспособности отечественной промышленности, так как открывает новые горизонты для внедрения инновационных технологий, которые могут значительно улучшить производственные показатели и снизить затраты на энергию.

В соответствии с вышеизложенным тема диссертационного исследования является актуальной.

Основные научные результаты и их значимость для науки и практики

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:

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.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций обеспечиваются методологией 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.

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 работы. 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. Установленные 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».

Общие замечания

По диссертационной работе можно отметить следующие замечания.

1. При составлении математической модели не рассмотрены особенности аэродинамической картины течения газообразных сред через слой засыпки.

2. Для получения информации о деталях протекания теплообменных и аэродинамических процессов в насадке целесообразно было бы использовать современные средства вроде ANSYS, Kompas Flow и т.д.

3. В результате потери части теплоты через корпус насадки температурное поле в поперечных сечениях становится неравномерным. Насколько обоснованным является допущение об идентичности температурного состояния всех шариков насадки в пределах каждого условно выделенного слоя?

4. При работе печи периодического действия в течение нагрева изменяется температура в печном пространстве. В предложенной расчетной методике расчет ведется для одного значения температуры печного пространства. Следовало бы предусмотреть процедуру расчетной проверки эффективности работы горелки при изменении температуры в печном пространстве.

5. Для согласования результатов математической модели и упрощенной расчетной методики вводится поправочный коэффициент b к среднеарифметическому температурному напору. Получена квадратичная зависимость $b = f(\Delta t)$. Не приводит ли использование этого коэффициента, определенного для конкретного диапазона высот насадки (0,4–0,9 м), к

потере универсальности методики при переходе к другим масштабам горелок.

6. Учитывалось ли при определении рационального диапазона времени переключения клапанов увеличение механического износа клапанного механизма при слишком частых переключениях?

7. В качестве теплоаккумулирующего элемента в работе рассматривается шариковая засыпка. В современной практике также применяются керамические насадки с каналами сложной геометрии. Обоснован ли выбор шариковой насадки с точки зрения достижения максимальной компактности и эффективности? Можно ли распространить полученные зависимости на другие типы насадок?

Однако, указанные замечания не снижают научную и практическую ценность данной диссертационной работы.

Заключение

Диссертация Начкебия Н.С. является законченной научной 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.

Диссертация отвечает требованиям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842 с изменениями (ред. от 16.10.2024), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор Начкебия Наталья Сергеевна заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника (технические науки).

Отзыв обсужден и единогласно одобрен на заседании кафедры «Автоматизация технологических процессов и производств» ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» «01» апреля 2026 г., протокол № 41.

Заведующий кафедрой «Автоматизация технологических процессов и производств»

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский государственный энергетический университет»,
профессор, д.т.н.
Владимирович



Дмитриев Андрей

Я, Дмитриев Андрей Владимирович, даю согласие на автоматизированную обработку моих персональных данных, указанных в отзыве, и размещение их на сайте ФГБОУ ВО ДонНТУ.

01.04.2026

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский государственный энергетический университет»

Адрес: 420066, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Красносельская, д. 51

Тел.: +7 (843) 519-42-20, +7 (843) 519-42-02

E-mail: kgeu@kgeu.ru

Подпись Дмитриева А.В. заверяю:

