

*На правах рукописи*

**ЯКОВЛЕВ ВИКТОР АЛЕКСАНДРОВИЧ**

**ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА СЖИГАНИЯ  
НЕТРАДИЦИОННЫХ ГАЗОВ В СИСТЕМАХ  
ТЕПЛОГАЗОСНАБЖЕНИЯ**

Специальность: **05.23.03 – Теплоснабжение, вентиляция,  
кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2016

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент  
**Комина Галина Павловна**

Официальные оппоненты: **Куцев Леонид Анатольевич**  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО «Белгородский государственный  
технический университет им. В.Г. Шухова»,  
кафедра теплогазоснабжения, профессор;

**Прохоров Сергей Григорьевич**  
кандидат технических наук, доцент,  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего обра-  
зования «Пензенский государственный уни-  
верситет архитектуры и строительства» (г.  
Пенза), доцент;

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Саратовский государственный  
технический университет им. Ю.А. Гагари-  
на», кафедра «Теплогазоснабжения, венти-  
ляции, водообеспечения и прикладной гид-  
рогазодинамики».

Защита диссертации состоится 27 декабря 2016 г. в 15:00 часов на заседа-  
нии диссертационного совета Д **212.223.06** при ФГБОУ ВО «Санкт-  
Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по  
адресу: 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., 4, зал заседаний  
диссертационного совета (аудитория 219).

Тел./Факс: (812) 316-58-72; E-mail: rector@spbgasu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-  
Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и  
на сайте [www.spbgasu.ru](http://www.spbgasu.ru).

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат технических наук,  
доцент

Виктор Алексеевич Пухкал

## I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность избранной темы.** В федеральном законе Российской Федерации № 261 «Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности...» предписывается широкое использование нетрадиционных горючих газов. Для эффективного их использования в системах теплогазоснабжения требуется разработка отечественного газогорелочного устройства усовершенствованной конструкции (УГГУ), которое позволит обеспечить качественное сжигание нетрадиционных газов. Эти газы являются невзаимозаменяемыми и требуют различных по конструкции газогорелочных устройств для обеспечения их полного сгорания.

Имеющиеся отечественные газогорелочные устройства не позволяют эффективно и экономично сжигать различные по составу и свойствам так называемые «невзаимозаменяемые» газы.

В системах теплогазоснабжения важную роль для эффективного использования газа и его качественного сжигания определяющую роль играют газогорелочные устройства. Следовательно, в настоящее время актуальным вопросом является повышение качества сгорания нетрадиционных газов в системах теплогазоснабжения.

**Степень разработанности темы исследования.** Теоретической базой исследования послужили работы отечественных и зарубежных ученых – Р.Б. Ахмедова, С.Е. Беликова, В.Ю. Безруких Е.А. Бирюзовой, А.Н. Воликова, Л.А. Вулиса, Т.А. Дацюк, Ю.В. Иванова, А.С. Иссерлина, Г.П. Коминой, Б.М. Кривоногова, Л.А. Кущева, А.М. Левина, Е.Е. Мариненко, В.П. Михеева, Н.Н. Осиповой, С.Г. Прохорова, М.Б. Равича, И.Я. Сигала, Н.Л. Стаскевича, Г.Н. Северинца, А.Л. Шкаровского, И.А. Шура, Р.И. Эстеркина, и др., занимавшихся разработкой и совершенствованием газогорелочных устройств для использования природных и искусственных газов.

**Цель исследования** заключается в разработке способов эффективного сжигания нетрадиционных газов в одном газогорелочном устройстве; создании методов расчета усовершенствованных узлов УГГУ.

### **Задачи исследования:**

– разработать аэродинамическую систему подготовки газозвушной смеси для УГГУ, обеспечивающую качественное сжигание газов в факеле регулируемой длины с минимальным коэффициентом избытка воздуха ( $\alpha$ ) направленное на повышение коэффициента полезного действия (КПД) тепловых установок и равномерным распределением температурных напряжений в топке на основании проведенных анализов показателей работы отечественных и зарубежных газогорелочных устройств и методов сжигания газа в существующих горелках;

– проанализировать существующие методы качества сжигания газа в существующих горелках;

– разработать новые конструкторские решения системы подготовки газозвушной смеси на основании численного моделирования и экспериментальных исследований горелки;

– разработать режимные параметры работы горелки, влияющие на длину факела полноту сгорания различных по составу невосзаменяемых газов (природного газа, биогаза и шахтного газа).

**Объект исследования** – системы теплогазоснабжения с УГГУ для сжигания нетрадиционных газов в тепловых установках.

**Предмет исследования** – газогорелочное устройство с принудительной подачей воздуха; аэродинамическая система подготовки газозвоздушной смеси горелки и процессы горения в разработанном УГГУ.

**Научная новизна исследования** заключается в достижении следующих результатов:

1. Разработана методика расчёта аэродинамической системы подготовки газозвоздушной смеси в горелке оборудованной щелевой камерой смешения с изменяющимся по высоте профилем сечения, заключающаяся в определении геометрической формы камеры смешения горелки, позволяющей обеспечить полное сгорание газа с минимальным коэффициентом избытка воздуха в факеле минимальной протяжённости;

2. Разработана геометрическая форма воздухораспределительного устройства, позволяющая выровнять скорости движения воздуха по сечению щелевой камеры смешения горелки и достичь требуемой равномерности состава газозвоздушной смеси и интенсивности её подготовки;

3. Выявлены зависимости минимальных коэффициентов избытка воздуха в горелке от вида газа, угла атаки газовых струй ( $\beta$ ) поперечного потока воздуха и тепловой мощности горелки;

4. Разработаны математические модели распределения концентраций метана в щелевой камере смешения, где выявлены смещения зоны основания факела в зависимости от вида газа, углов атаки газовых струй и формы щелевой камеры смешения для двух предельных тепловых нагрузок горелки;

5. Получены графические и математические зависимости влияния угла атаки газовых струй, давления газа перед горелкой, формы щелевой камеры смешения, состава газа на длину факела и качество его сгорания;

6. Определено влияние вида газа на распределение температурных полей по топочному объёму тепловой установки.

**Теоретическая значимость работы** заключается в развитии использования систем теплогазоснабжения для сжигания нетрадиционных газов с использованием УГГУ.

**Практическая значимость** исследований заключается в возможности использования разработанных методов в практической деятельности в конструкторских отделах проектных организаций.

**Методы исследования.** В диссертации использовались методы численного моделирования и натурного эксперимента. Обработка полученных результатов натурного эксперимента проводилась методом математической статистики.

**Положения, выносимые на защиту:**

– методика расчёта аэродинамической системы подготовки газозвоздушной смеси в горелке оборудованной щелевой камерой смешения с изменяющимся по высоте профилем сечения, заключающаяся в определении геометрической

формы камеры смешения горелки, позволяющей обеспечить полное сгорание газа с минимальным коэффициентом избытка воздуха в факеле минимальной протяжённости;

– геометрическая форма воздухораспределительного устройства, позволяющая выровнять скорости движения воздуха по сечению щелевой камеры смешения горелки и достичь требуемой равномерности состава газозвдушной смеси и интенсивности её подготовки;

– зависимости минимальных коэффициентов избытка воздуха в горелке от вида газа, угла атаки газовых струй ( $\beta$ ) поперечного потока воздуха и тепловой мощности горелки;

– математические модели распределения концентраций метана в щелевой камере смешения, где выявлены смещения зоны основания факела в зависимости от вида газа, углов атаки газовых струй и формы щелевой камеры смешения для двух предельных тепловых нагрузок горелки;

– графические и математические зависимости влияния угла атаки газовых струй, давления газа перед горелкой, формы щелевой камеры смешения, состава газа на длину факела и качество его сгорания;

– влияние вида газа на распределение температурных полей по топочному объёму тепловой установки.

**Область исследования** соответствует паспорту специальности 05.23.03 «Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение», а именно п. 1: «Совершенствование, оптимизация и повышение надежности систем теплогазоснабжения, отопления, вентиляции и кондиционирования, методов их расчета и проектирования. Использование нетрадиционных источников энергии» п. 3: «Создание и развитие эффективных методов расчета и экспериментальных исследований систем теплоснабжения, вентиляции, кондиционирования воздуха, газоснабжения, освещения, защиты от шума».

**Степень достоверности и апробация результатов.** Достоверность результатов исследования подтверждается результатами натурных исследований; удовлетворительной сходимостью результатов аналитических расчетов с данными, полученными экспериментальным путем и методов математического анализа с применением современного программного обеспечения; правомерностью принятых допущений. Получение положительных результатов апробации горелочного устройства на тепловой установке в ООО «Балткотломаш» (г. Санкт-Петербург).

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на: 60-й Международной научно-технической конференции молодых учёных «Актуальные проблемы современного строительства», г. Санкт-Петербург; 64-й Научной конференции профессоров, преподавателей, научных работников, инженеров и аспирантов университета, г. Санкт-Петербург; 65-й научной конференции профессоров, преподавателей, научных работников, инженеров и аспирантов университета, г. Санкт-Петербург; 66-й научной конференции профессоров, преподавателей, научных работников, инженеров и аспирантов университета, г.

Санкт-Петербург; 67-й научной конференции профессоров, преподавателей, научных работников, инженеров и аспирантов университета 3–5 февраля 2010 г., г. Санкт-Петербург; Всероссийской научно-практической конференции «Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии» 22–26 ноября 2010 г., г. Екатеринбург; 68-й научной конференции профессоров, преподавателей, научных работников, инженеров и аспирантов университета 2–4 февраля 2011 г., г. Санкт-Петербург; Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов, молодых учёных и докторантов «Актуальные проблемы строительства и архитектуры» 10–12 апреля 2012 г., г. Санкт-Петербург; VII Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием) «Развитие дорожно-транспортного комплекса и строительной инфраструктуры на основе рационального природопользования» 26–27 апреля 2012 г., г. Омск; Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии.» 18–21 декабря 2012 г., г. Екатеринбург; Всероссийской научной конференции «Градостроительство. Инфраструктура. Коммуникации» 18–20 ноября 2014 г., г. Воронеж.

Основные результаты исследований апробированы в ООО «Балткотломаш» (г. Санкт-Петербург), ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» (г. Санкт-Петербург).

**Публикации.** Основные результаты диссертации опубликованы в 16 научных работах, общим объемом 6,07 п. л., в том числе 4 в рецензируемых изданиях из перечня, размещенного на официальном сайте ВАК.

Отправлено и принято на рассмотрение к экспертизе 3 заявки для получения патента на изобретение:

**Заявка 1:** Щелевая горелка с принудительной подачей воздуха, Авторы: В. А. Яковлев, Е. А. Бирюзова, Г. П. Комина, В. Ю. Безруких, Дата поступления: 13.04.2016, Входящий № 22544, Регистрационный № 2016114367.

**Заявка 2:** Щелевая горелка с принудительной подачей воздуха, Авторы: В. А. Яковлев, Е. А. Бирюзова, Г. П. Комина, В. Ю. Безруких, Дата поступления: 15.06.2016, Входящий № 037434, Регистрационный № 2016123915.

**Заявка 3:** Щелевая горелка с принудительной подачей воздуха, Авторы: В. А. Яковлев, Е. А. Бирюзова, Г. П. Комина, В. Ю. Безруких, Дата поступления: 15.06.2016, Входящий № 037440, Регистрационный № 2016123921.

**Структура и объем диссертационной работы.** Диссертация изложена на 177 страницах учитываемого печатного текста, состоит из введения, пяти глав, заключения, включающего 150 источников библиографического списка и 10 приложений. В работе представлен 72 рисунка и 20 таблиц.

*Во введении* обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели исследований, задачи, предмет и объект исследования, описаны методы исследования, практическая и теоретическая значимость работы, приведены сведения об апробации научных результатов, имеющих публикации и общей структуре работы.

*В первой главе* приведена общая характеристика устройств, используемых для сжигания газов; рассмотрены основные методы сжигания газа и проблемы перевода горелок на невязимозаменяемый газ; выполнен обзор газогорелочных устройств с принудительной подачей воздуха.

*Во второй главе* рассмотрены основные приёмы интенсификации процессов горения газов; основные законы струйных течений; представлены основные решения, использованные при разработке газогорелочного устройства с принудительной подачей воздуха и щелевой камерой смешения; методика расчёта щелевых горелок; методика расчёта воздухоподающего короба горелки и воздухораспределительной решётки; рассмотрена методика проверки равномерности раздачи газа из отверстий по длине коллекторов.

*В третьей главе* определены пределы регулирования тепловой мощности горелки; рассмотрена методика экспериментальных исследований для оценки эффективности работы воздухораспределительных устройств и методика исследования энергетических показателей работы горелки; представлено описание экспериментального стенда для проведения испытаний; рассмотрена приборная база для проведения экспериментов, а также порядок и программа испытаний; рассмотрена методика обработки экспериментальных данных методом математической статистики.

*В четвертой главе* проведен подбор оптимальной формы сечения воздухораспределительного короба методом численного моделирования с использованием программного комплекса ANSYS Fluent; представлены результаты экспериментальных исследований воздухораспределительной системы, полученные на холодном испытательном стенде.

*В пятой главе* представлены результаты исследований изменения минимальных коэффициентов избытка воздуха в горелке; результаты экспериментальных исследований скорости выгорания горючих компонентов по высоте топки, а также влияния регулируемых факторов на длину пламени; показано распределение тепловых напряжений топки при работе горелки на невязимозаменяемых газах с номинальной тепловой мощностью.

*В заключении* изложены основные итоги проведённых исследований, сформулированы полученные результаты.

## **II. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ**

**1. Методика расчёта аэродинамической системы подготовки газоздушной смеси в горелке оборудованной щелевой камерой смешения с изменяющимся по высоте профилем сечения, заключающаяся в определении геометрической формы камеры смешения горелки, позволяющей обеспечить полное сгорание газа с минимальным коэффициентом избытка воздуха в факеле минимальной протяжённости**

Для решения поставленной задачи рассмотрена теория взаимодействия газовых струй с набегающим поперечным потоком воздуха.

Основное влияние на геометрию процессов смешения оказывает гидродинамический параметр  $q$  основанный на известной зависимости:

$$q = \frac{w_{\Gamma}^2 \rho_{\Gamma}}{w_{\text{В}}^2 \rho_{\text{В}}}, \quad (1)$$

где  $w_{\Gamma}$ ,  $w_{\text{В}}$  – скорость газа и воздуха, м/с;  $\rho_{\Gamma}$ ,  $\rho_{\text{В}}$  – плотность газа и воздуха, кг/м<sup>3</sup>.

Учитывая недостатки щелевых горелок предыдущих конструкций было запроектировано УГГУ с другой конструкцией смесительного аппарата (рисунок 1).

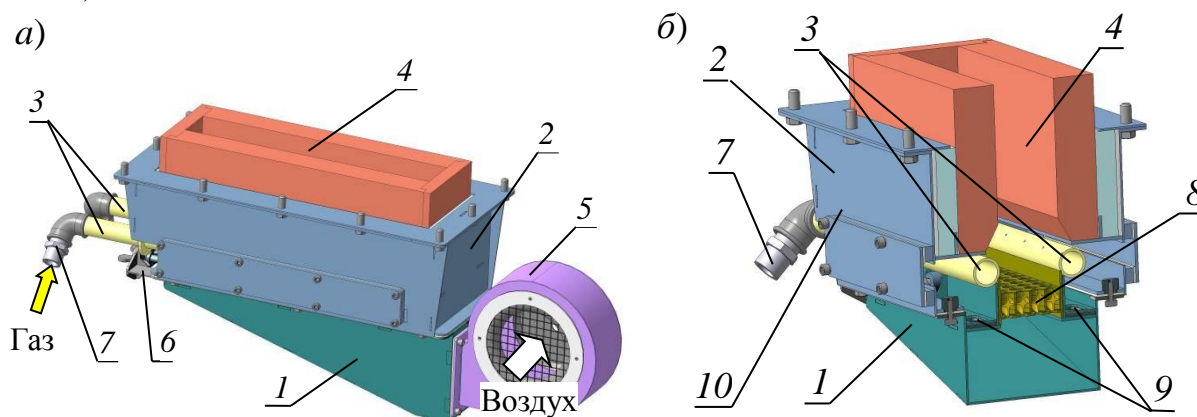


Рисунок 1 – Экспериментальное УГГУ мощностью 100 кВт

*a* – внешний вид; *б* – поперечный разрез; 1 – воздухораспределительный (нижний) короб; 2 – щелевой (верхний) короб; 3 – коллектора; 4 – щелевая камера смешения; 5 – вентилятор для подачи воздуха на горение; 6 – заслонка для регулирования перепуска воздуха за задние стенки коллектора; 7 – патрубки для подключения горелки к системе газоснабжения; 8 – решётка с интенсификаторами (турбулизаторами); 9 – отверстия для перепуска воздуха за заднюю стенку коллекторов; 10 – теплоизоляция

Для удобства проведения эксперимента было создано УГГУ минимальных размеров мощности 100 кВт, представленное на рисунке 1.

Объектом усовершенствования является щелевая камера смешения и газовые коллектора УГГУ.

На рисунке 2 представлен поперечный разрез УГГУ и схема распределения струй. Такая схема распределения струй обладает максимальной равномерностью и площадью взаимодействия струй с окислителем при этом будет обеспечена максимальная интенсивность подготовки газовой смеси.

Для эффективного и экономичного сжигания не только природного, но и различных газов невзаимозаменяемых по составу с природным, в конструкции горелки предусмотрена возможность управления процессами подготовки газовой смеси. Это достигается путём установки поворачивающихся коллекторов, способных согласно известному закону (2) воздействовать на дальность струй ( $h$ ) и тем самым регулировать площадь контакта струй с окислителем.

$$h = k_s k_{\beta} d_o \sqrt{q} \quad (2)$$

где  $h$  – дальность струй, мм;  $q$  – гидродинамический параметр;  $k_s$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от относительного шага газовых струй;  $k_{\beta}$  – поправочный коэффициент, зависящий от угла атаки газовых струй  $\beta$ ;  $d_o$  – диаметр проходного сечения газовыпускных отверстий коллектора, мм.



Горелка состоит из двух частей: нижнего и верхнего коробов, изготовленных из черной листовой стали толщиной 3–4 мм.

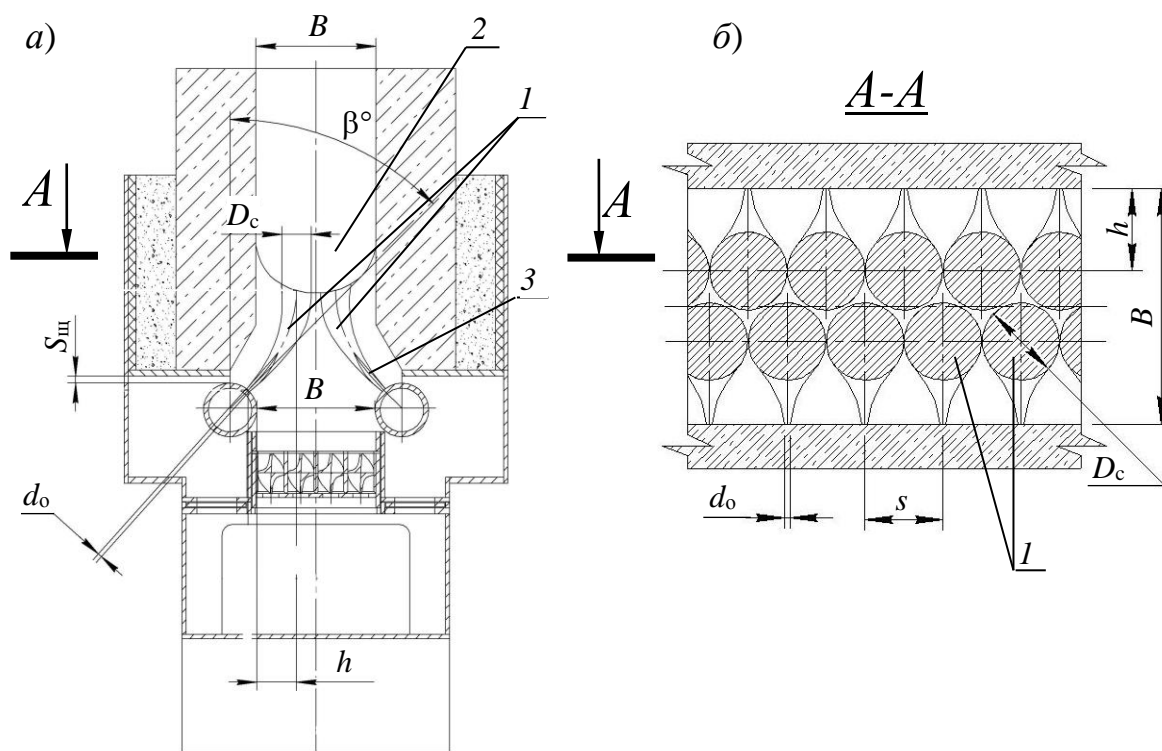


Рисунок 2 – Схема распределения газовых струй в живом сечении щелевого канала горелки  
 а – вертикальный разрез горелки; б – продольный разрез щели, выполненный в горизонтальной плоскости канала с обозначением развивающихся в нём газовых струй;  
 $l$  – газозвушнные струи; 2 – место начала горения газозвушной смеси; 3 – ядро струи

Верхний короб содержит три воздухораспределительные камеры: центральная – обеспечивает подвод воздуха в щелевую камеру смешения, две боковые – передают часть от общего расхода воздуха за задние стенки коллекторов, организовывая его выпуск через щелевые зазоры шириной  $S_{щ}$ , образованные наружными поверхностями коллекторов и нижней плоскостью плиты основания огнеупорных плит.

Щелевая камера смешения шириной  $B$  выполнена из огнеупорных плит и может иметь, как прямоугольную, так и профильную форму.

Газовый коллектор состоит из двух параллельных перфорированных труб, каждая из которых имеет по одному ряду газовыпускных отверстий, размещённым с шагом  $s$ . В собранной горелке газовыпускные отверстия расположены друг относительно друга с отставанием на полшага  $s/2$ , напоминая в плане шахматный порядок.

Для регулирования углов  $\beta$  коллектора снабжены возможностью поворота вокруг своей оси, что в сочетании с варьированием расхода воздуха, позволит не только регулировать тепловую мощность горелки, но и, воздействуя на дальность газовых струй ( $h$ ) и интенсивность процессов смешения, в широких пределах изменять геометрию факела.

В промежутке между верхним и нижним коробом установлена воздухо-распределительная решётка (рисунок 3) способная выравнивать скорости движения воздуха в проходном сечении щелевой камеры смешения. Для создания

локальной закрутки потока в целях интенсификации процессов смесеобразования решётка снабжена размещёнными в коридорном порядке с постоянным поперечным и продольным шагом гнёздами с вмонтированными в них интенсификаторами (турбулизаторами воздушного потока).

Конструкция решётки позволяет получать на выходе турбулентный поток воздуха, обеспечить выравнивание скорости движения потока в проходном сечении щелевой камеры смешения и интенсифицировать процессы смесеобразования в горелке (рисунок 3).

В основании решётки каждый канал снабжён отверстием меньшего диаметра, чем гнездо с интенсификатором, что увеличивает аэродинамическое сопротивление решётки и обеспечивает в воздухораспределительной камере УГГУ более высокое статическое давление, улучшающее равномерность раздачи воздуха.

В диссертации представлена схема системы автоматики для УГГУ, где была принята схема последовательной системы управления горением, оснащённая корректором-анализатором качества горения (КАКГ).

## 2. Геометрическая форма воздухораспределительного устройства, позволяющая выровнять скорости движения воздуха по сечению щелевой камеры смешения горелки и достичь требуемой равномерности состава газозвушной смеси и интенсивности её подготовки

Объектом исследования является щелевая камера смешения УГГУ. Было использовано два метода получения данных: метод численного моделирования с применением программного комплекса ANSYS Fluent и натурный эксперимент.

Численное моделирование проводилось на математической 3D модели стенда (рисунок 4) при пяти различных вариантах конструктивного исполнения воздухораспределительной системы горелки, двух различных формах сечения щелевой камеры смешения (с профилем постоянного и переменного сечений) и двух крайних (предельных) режимов работы УГГУ, соответствующих самым

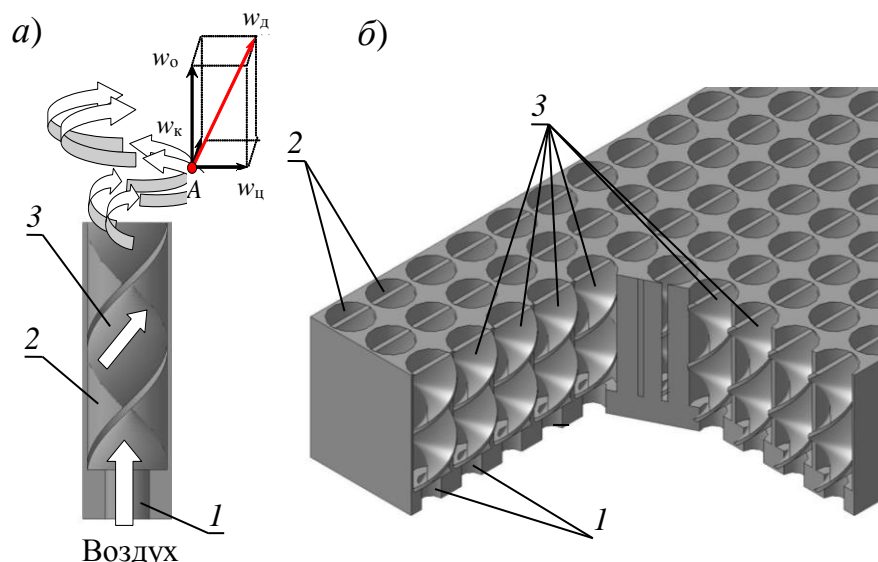


Рисунок 3 – Воздухораспределительная решётка с интенсификаторами

*а* – схема работы интенсификатора решётки; *б* – аксонометрическая схема устройства решётки с местным разрезом; 1 – входные отверстия; 2 – стаканы; 3 – интенсификаторы;  $w_d$  – результирующий вектор скорости потока;  $w_ц$  – центробежная составляющая скорости потока;  $w_к$  – касательная составляющая скорости потока;  $w_о$  – осевая составляющая скорости потока

минимальным и максимальным расходам воздуха при использовании любого из исследуемых видов газа в пределах тепловой мощности 20–100 кВт.

Согласно выполненным расчётам, максимальный расход воздуха на горение наблюдается при работе горелки с номинальной мощностью (100 кВт) на природном газе ( $V_{\text{в}} = 125 \text{ м}^3/\text{ч}$ ), а минимальный расход воздуха – при работе горелки с 20 % номинальной мощностью (20 кВт) при работе на шахтном газе ( $V_{\text{в}} = 22,7 \text{ м}^3/\text{ч}$ ).

Все полученные результаты численного моделирования движения воздуха на выходе из щелевой камеры смешения УГГУ вдоль её продольной центральной осевой представлены в диссертации.

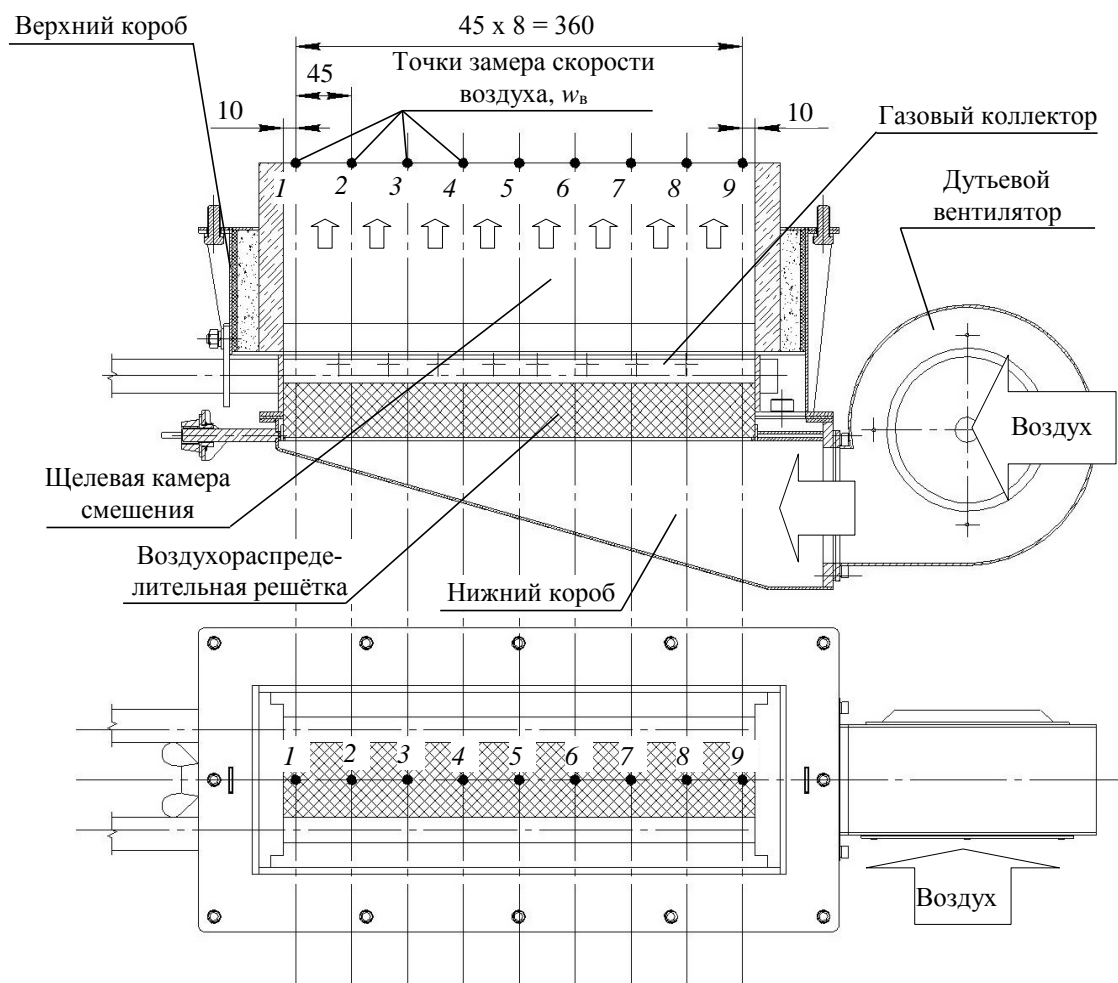


Рисунок 4 – Схема испытательного стенда с нанесением точек замера скоростей воздуха

Зависимость, построенная по результатам проведения натурального эксперимента для двух крайних режимов работы УГГУ, оснащённого щелевой камерой смешения с изменяющимся профилем сечения, представлены на рисунке 5.

Для натурального эксперимента было принято четыре варианта воздухораспределительной системы УГГУ:

**Первый вариант** – система, оснащённая воздухораспределительным клиновидным коробом, сечения которого рассчитаны по условию обеспечения равномерной раздачи воздуха, без установки в основании щелевой камеры смешения воздухораспределительных устройств (воздух направляется в камеру смешения напрямую). Геометрические размеры короба 116×130×430 мм.

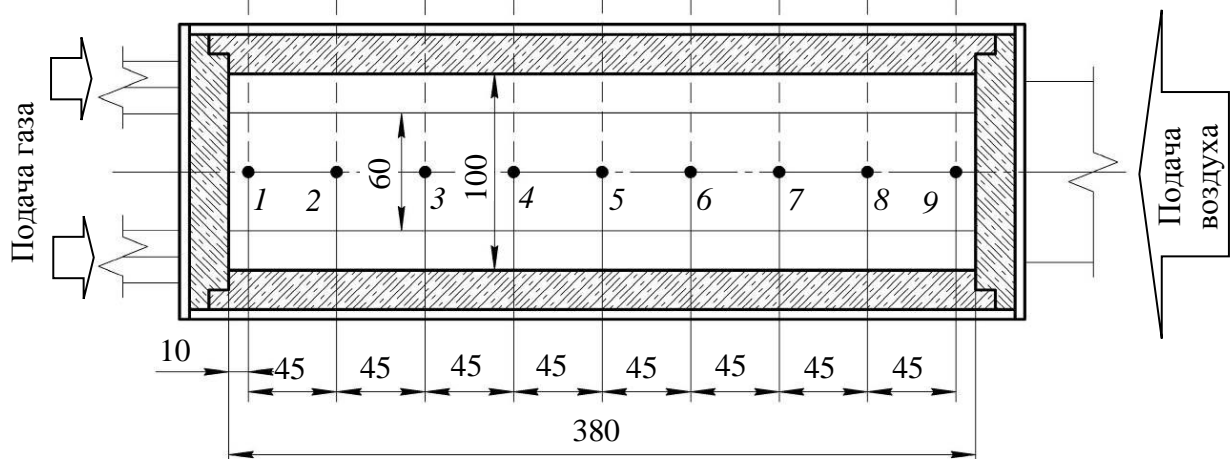
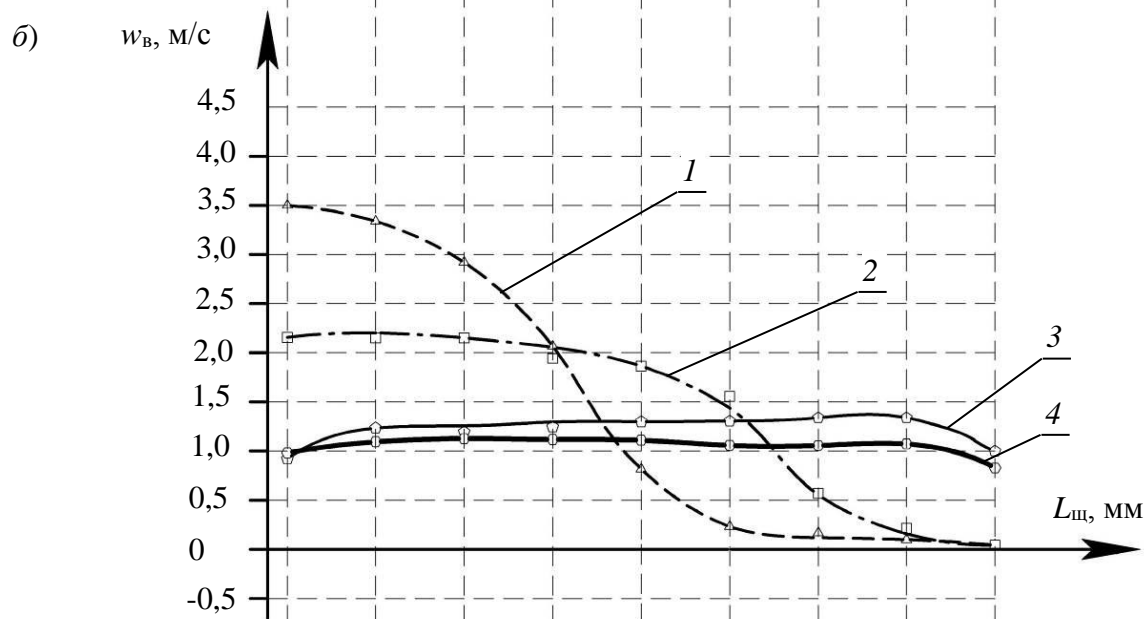
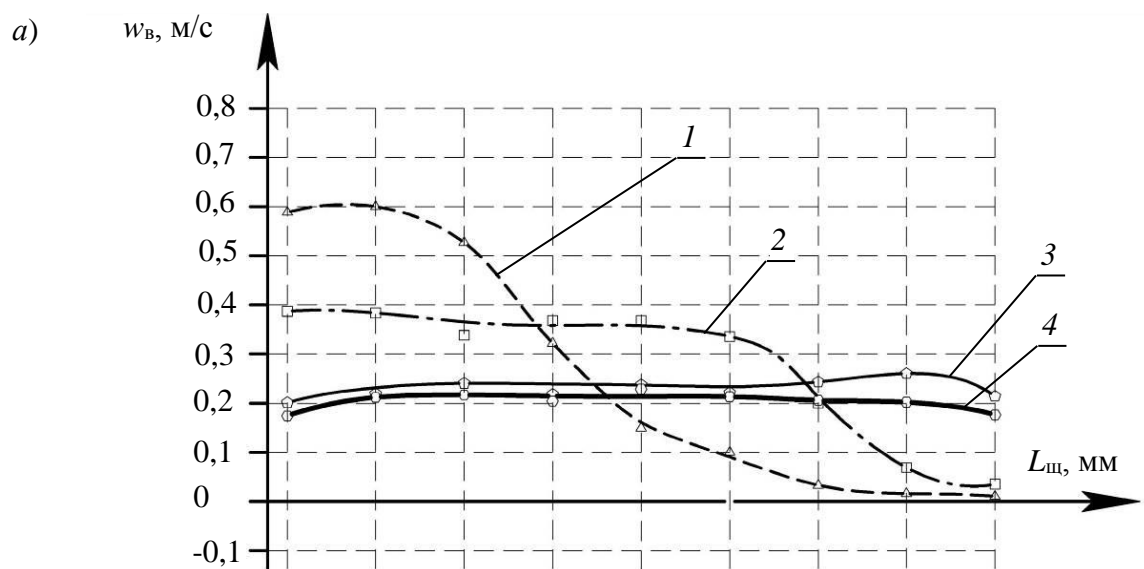


Рисунок 5 – Зависимости изменения скорости воздуха на выходе из щелевой камеры смешения с изменяющимся по высоте сечением построенные на основании обработки данных полученных при исследовании системы на испытательном стенде

*a* – зависимости распределения скоростей воздуха при подачи его с расходом  $V_B = 125 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;  
*б* – зависимости распределения скоростей воздуха при подачи его с расходом  $V_B = 22,7 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

Размеры соединительного патрубка для подключения вентилятора 94×92 мм. В верхней части короб оборудован прямоугольным каналом для подачи воздуха в щелевую камеру смешения полностью совпадающим с ней по размерам поперечного сечения (рисунок 5, зависимость 1).

**Второй вариант** – аэродинамическая система, в которой клиновидный короб применяется в комбинации с воздухораспределительным устройством, представляющим собой перфорированный лист толщиной 3 мм с равномерно размещёнными в нём в коридорном порядке с одинаковым поперечным и продольным шагом отверстиями диаметром 8 мм (рисунок 5, зависимость 2).

**Третий вариант** – аэродинамическая система, где в комбинации с клиновидным коробом используется воздухораспределительное устройство, представляющим собой перфорированный лист толщиной 20 мм с равномерно размещёнными на нём в коридорном порядке с одинаковым поперечным и продольным шагом отверстиями диаметром 8 мм (рисунок 5, зависимость 3).

**Четвёртый вариант** – аэродинамическая система, где в комбинации с клиновидным коробом используется устройство, представляющее собой **воздухораспределительную решётку, оснащённую интенсификаторами турбулентного движения воздушного потока (турбулизаторами)** (рисунок 5, зависимость 4).

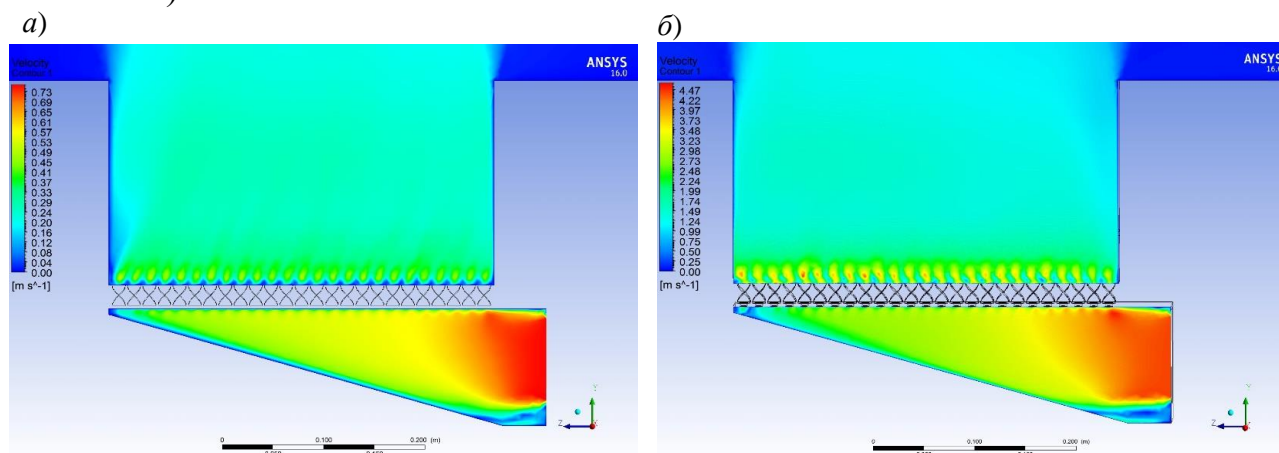


Рисунок 6 – Модели процессов движения воздуха в воздухораспределительной системе горелки с применением короба переменного по длине сечения с установкой перед щелевой камерой смешения воздухораспределительного устройства в виде решётки толщиной 20 мм с интенсификаторами турбулентного движения потока

*a* – минимальный расход воздуха на горелку щелевая камера смешения с изменяющимся сечением; *б* – максимальный расход воздуха на горелку щелевая камера смешения с изменяющимся сечением

Результаты численного моделирования всех вариантов аэродинамических систем показали, что наиболее равномерное распределения скоростей движения воздуха имеет воздухораспределительная система, оснащённая решёткой с интенсификаторами, которую следует рассматривать в качестве наилучшего варианта из всех рассмотренных.

Диапазон изменения скорости потока для обоих вариантов формы профиля камеры смешения составляет: 0,9–1,4 м/с – при работе горелки с максимальным расходом воздуха и 0,15–0,25 м/с – при работе с минимальным расходом воздуха.

Такое распределение скоростей в сравнении с предыдущими вариантами является наиболее предпочтительным, так как в этом случае изменения скоростей имеют наименьшие значения. Эффект выравнивания скорости достигается за счёт установки интенсификаторов. Возникновение в основании потока множества вихрей увеличивает степень его турбулентности и интенсифицирует процесс смесеобразования, что на всех режимах работы горелки исключает возникновение зон возвратных токов и выравнивает скорости движения воздуха в проходном сечении щелевой камеры смешения УГГУ (рисунок 6).

### 3. Зависимости минимальных коэффициентов избытка воздуха в горелке от вида газа, угла атаки газовых струй поперечного потока воздуха и тепловой мощности горелки

В целях изучения влияния особенностей конструкции горелки на качество сжигания природного газа, биогаза и шахтного газа использовался специально разработанный экспериментальный стенд (рисунок 7).

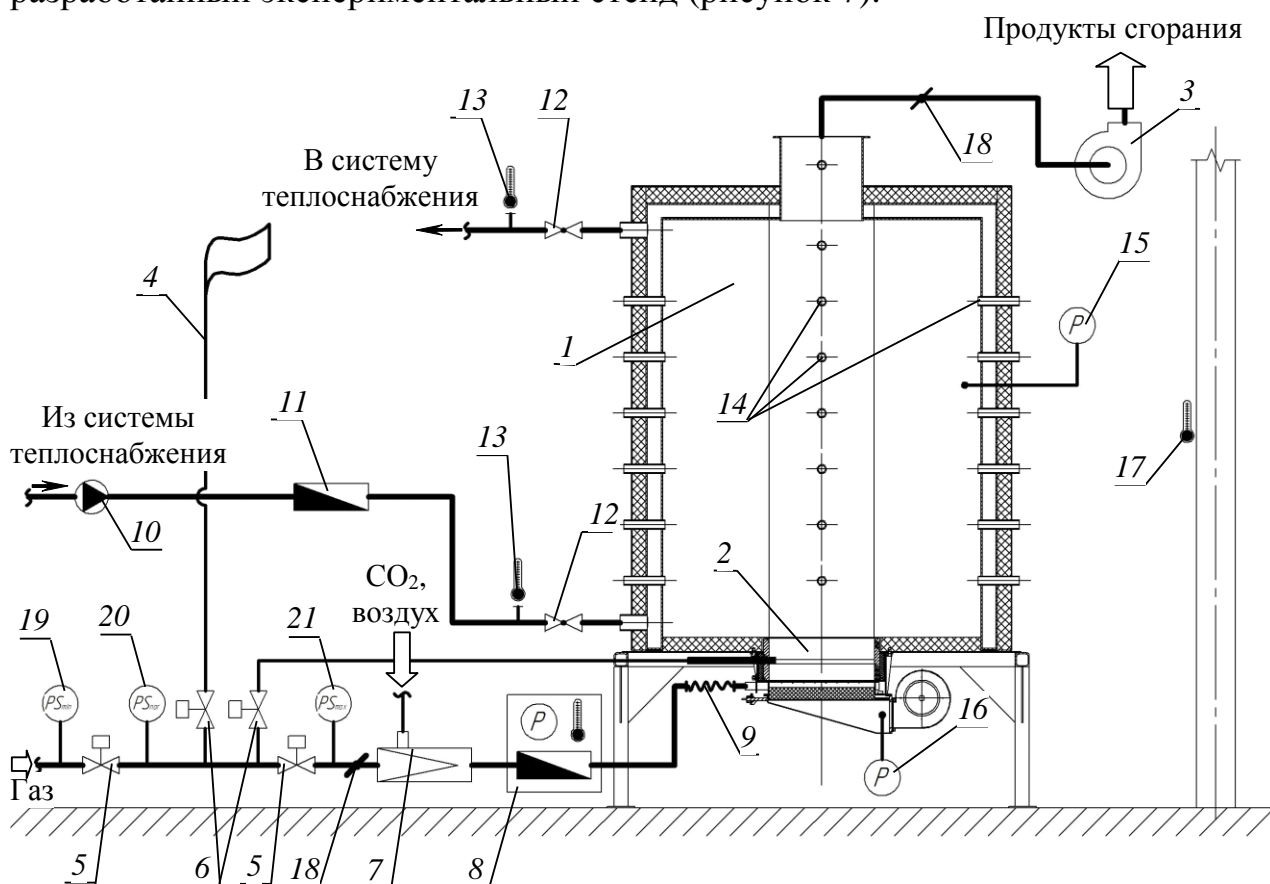


Рисунок 7 – Схема экспериментального испытательного стенда

1 – топочный объём; 2 – горелка; 3 – подающий трубопровод системы теплоснабжения; 4 – трубопровод безопасности; 5 – запорные устройства на подающем газопроводе; 6 – запорное устройство на трубопроводе безопасности и подающем трубопроводе запальника; 7 – газовый смеситель; 8 – система комплексного учёта газа *Turbo Flow GFG*; 9 – гибкая вставка; 10 – циркуляционный насос; 11 – расходомер; 12 – запорные устройства системы теплоснабжения; 13 – термометр; 14 – пробоотборные лючки; 15 – тягонапоромер ТНМП-52; 16 – напоромер НМ-60; 17 – термометр БТ-52.211; 18 – заслонка; 19 – датчик контроля минимального давления газа на входе; 20 – датчик контроля герметичности; 21 – датчик контроля максимального давления перед горелкой



Для определения минимального  $\alpha$ , с которым может эффективно работать УГГУ были проведены испытания, позволяющие выявить зависимость изменения минимального  $\alpha$  от давления газа перед горелкой, вида газа и тепловой мощности.

Исследования проводились для двух форм щелевой камеры смешения горелки (с изменяющимся и неизменяющимся сечением) и трёх углов  $\beta$  ( $27^\circ$  – для природного газа,  $23^\circ$  – для биогаза и шахтного газа,  $45^\circ$  и  $60^\circ$  – для всех видов газа).

В процессе проведения испытаний измерялся уровень содержания кислорода и оксида углерода в уходящих газах при достижении тепловой мощности УГГУ 20, 50, 80 и 100 % от номинальной (20, 50, 80 и 100 кВт). Минимальные концентрации  $O_2$ , максимальные концентрации  $CO_2$  и отсутствие  $CO$  в уходящих газах свидетельствуют о минимальных  $\alpha$  при горении. Полученные результаты исследований представлены на рисунок 8.

Из графика видно, что при сжигании природного газа для всех углов  $\beta$  в пределах  $27-60^\circ$ , а для биогаза и шахтного газа в пределах  $23-60^\circ$  не зависимо от формы профиля щелевой камеры смешения при снижении тепловой мощности устройства до 50 кВт,  $\alpha$  остаётся величиной постоянной и равной 1,08. При дальнейшем снижении тепловой нагрузки  $\alpha$  начинает увеличиваться. Темп роста  $\alpha$  зависит от угла  $\beta$ , и вида газа (состава газа). При снижении тепловой мощности ниже 50 кВт для всех видов исследуемых газов  $\alpha$  увеличивается. Для более детальной оценки темпа роста  $\alpha$  для данного исследования были внесены дополнительные контрольные точки, соответствующие 30 % и 40 % номинальной мощности устройства.

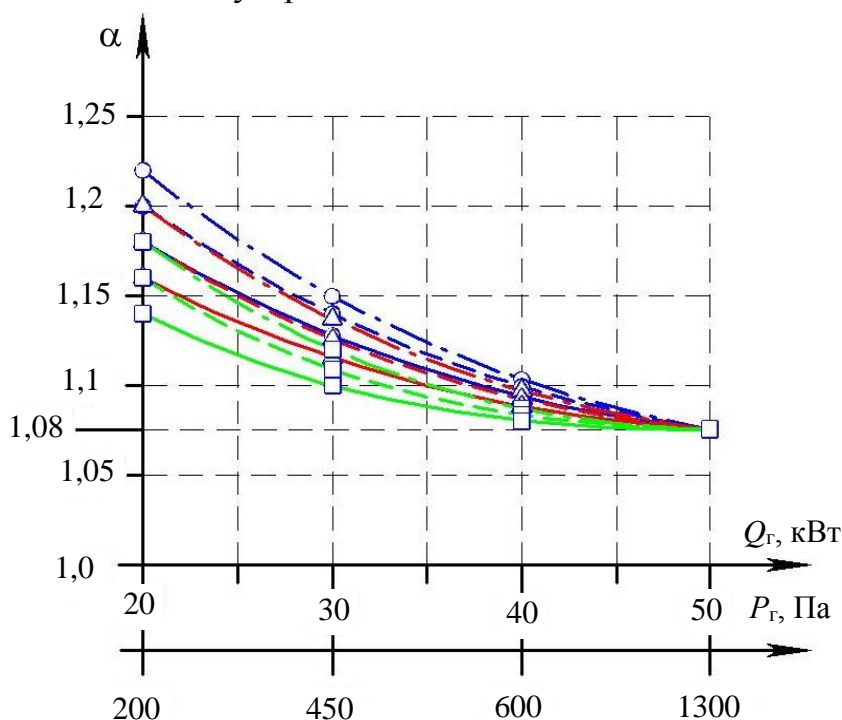


Рисунок 8 – Зависимость изменения коэффициента избытка воздуха от угла атаки  $\beta$ , тепловой мощности горелки, вида газа и давления газа перед горелкой

Штрихпунктирная линия – угол атаки  $45^\circ$ ; Пунктирная линия – угол атаки  $60^\circ$ ; Сплошная линия – угол атаки  $27^\circ$  для природного газа и  $23^\circ$  для биогаза и шахтного газа

**Синие линии** – сжигание природного газа; **Красные линии** – сжигание биогаза; **Зелёные линии** – сжигание шахтного газа

Представленные на рисунке 8 максимальные значения  $\alpha$  при сжигании природного газа и достижении тепловой мощности 20 кВт в зависимости от угла атаки газовых струй  $\alpha$  достигает значений, представленных в таблице 1.

Такое изменение  $\alpha$  при снижении тепловой мощности УГГУ объясняется снижением интенсивности смесеобразования вследствие уменьшения площади контакта газовых струй с окислителем. При снижении тепловой мощности и постоянном значении  $\alpha$  вследствие снижения скоростей движения потоков, контактируемых в щелевой камере смешения, снижается интенсивность подготовки газоздушнoй смеси, что приводит к переносу в топочный объём значительной части реакций горения протекающих по диффузионному принципу. Это неминуемо сказывается на увеличении длины факела и появлению химического недожога, для снижения которого требуется увеличивать  $\alpha$ .

Несинхронный темп роста  $\alpha$  при снижении тепловой мощности УГГУ ниже 50 кВт объясняется тем, что для газов обладающих разной калорийностью, степенью забалластированности требуется разное количество времени для подготовки горючей газоздушнoй смеси.

Таблица 1 – Значения  $\alpha$  в зависимости от угла  $\beta$  при сжигании природного газа и достижении тепловой мощности 20 кВт

Вид газа	Угол атаки струй $\beta$			
	23°	27°	45°	60°
Природный газ	–	1,18	1,2	1,22
Биогаз	1,16	–	1,18	1,2
Шахтный газ	1,14	–	1,16	1,18

#### **4. Математические модели распределения концентраций метана в щелевой камере смешения, где выявлены смещения зоны основания факела в зависимости от вида газа, углов атаки газовых струй и формы щелевой камеры смешения для двух предельных тепловых нагрузок горелки**

Цель данных исследований заключалась в проверке влияния характера распределения газовых струй на место расположения зоны начала горения.

Учитывая сложность создания конструкции горелки, позволяющей экспериментальным путём определить место расположения зоны горения (основания факела), было проведено численное моделирование с построением полей массовых концентраций метана, соответствующих верхнему и нижнему пределам воспламенения смеси, отражающих границы воспламеняемой (горючей) смеси.

С изменением тепловой мощности УГГУ характер размещения струй (дальнобойность  $h$  и диаметр максимального раскрытия струй  $D_c$ ) меняется незначительно.

Численное моделирование проводилось для двух крайних мощностных режимов работы устройства 20 кВт и 100 кВт (20 % и 100 % номинальной мощности соответственно), двух форм профиля щелевой камеры смешения, углов  $\beta$  соответствующих расчётным (27° – при сжигании природного, 23° – при сжигании биогаза и шахтного газа) и трёх видов газов (природного газа, биогаза и шахтного газа).

Поля позволяют определить зону расположения основания факела при работе горелки на различных тепловых нагрузках. Результаты численного моделирования работы УГГУ представлены в таблице 2.



Из таблицы 2 видно, что с увеличением тепловой мощности УГГУ и с уменьшением угла  $\beta$  место расположения основания факела отдалается от основания щелевой камеры смешения. Это объясняется тем, что с увеличением тепловой мощности в щелевой камере смешения растут скорости движения газозвушной смеси, вследствие чего газозвушная смесь становится горючей на более большом расстоянии. Место расположения зоны начала горения в зависимости от формы щелевой камеры смешения практически не изменяется.

Таблица 2 – Положения основания факела в щелевой камере смешения

Вид топлива	Щелевая камера смешения с изменяющимся сечением (мощность 100 кВт)		Щелевая камера смешения с неизменяющимся сечением (мощность 100 кВт)	
	Угол <b>27°</b> (23°)	Угол <b>60°</b>	Угол <b>27°</b> (23°)	Угол <b>60°</b>
Природный газ	<b>90</b>	<b>40</b>	<b>80</b>	<b>40</b>
Биогаз	<b>60</b>	<b>30</b>	<b>60</b>	<b>30</b>
Шахтный газ	<b>70</b>	<b>40</b>	<b>70</b>	<b>30</b>
	Щелевая камера смешения с изменяющимся сечением (мощность 20 кВт)		Щелевая камера смешения с неизменяющимся сечением (мощность 20 кВт)	
	Угол <b>27°</b> (23°)	Угол <b>60°</b>	Угол <b>27°</b> (23°)	Угол <b>60°</b>
Природный газ	<b>60</b>	<b>20</b>	<b>60</b>	<b>20</b>
Биогаз	<b>50</b>	<b>10</b>	<b>40</b>	<b>20</b>
Шахтный газ	<b>40</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>20</b>

### 5. Графические и математические зависимости влияния угла атаки газовых струй, давления газа перед горелкой, формы щелевой камеры смешения, состава газа на длину факела и качество его сгорания

По результатам экспериментальных исследований влияния давления газа перед горелкой, угла  $\beta$  и формы профиля сечения щелевой камеры смешения на полноту выгорания горючих веществ были получены экспериментальные зависимости изменения концентраций  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}$ , (% об.) по длине топки при сжигании природного газа, биогаза и шахтного газа, после обработки которых составлены зависимости изменения длины факела  $H_f$  от тепловой мощности горелки  $Q_r$ , давления газа перед горелкой  $P_r$ , вида газа и формы щелевой камеры смешения (рисунок 9) и зависимости изменения длины факела  $H_f$  от тепловой мощности горелки  $Q_r$ , угла атаки  $\beta$ , вида газа и формы щелевой камеры смешения (рисунок 10).

По графикам (рисунок 9) видно, что с увеличением тепловой мощности УГГУ в пределах 20–100 кВт при минимальном  $\alpha$  для всех видов используемых при испытании газов длина факела ( $H_f$ ) увеличивается по линейному закону.

При изменении угла  $\beta$  (рисунок 10) длина факела зависит от интенсивности подготовки газозвушной смеси в щелевой камере смешения.

Из графиков (рисунок 10), представляющих собой аппроксимацию экспериментальных данных следует, что максимальная длина факела не зависимо от вида газа и формы щелевой камеры смешения наблюдается при раздаче газа с углом  $\beta$  близкому к  $45^\circ$ . Коэффициент детерминации при аппроксимации кри-

вых соответствует диапазону 0,96–0,98. При уменьшении или увеличении угла  $\beta$  длина факела снижается. Такое явление объясняется ростом интенсивности смешения и качества подготовки газозадушной смеси при изменении угла  $\beta$ .

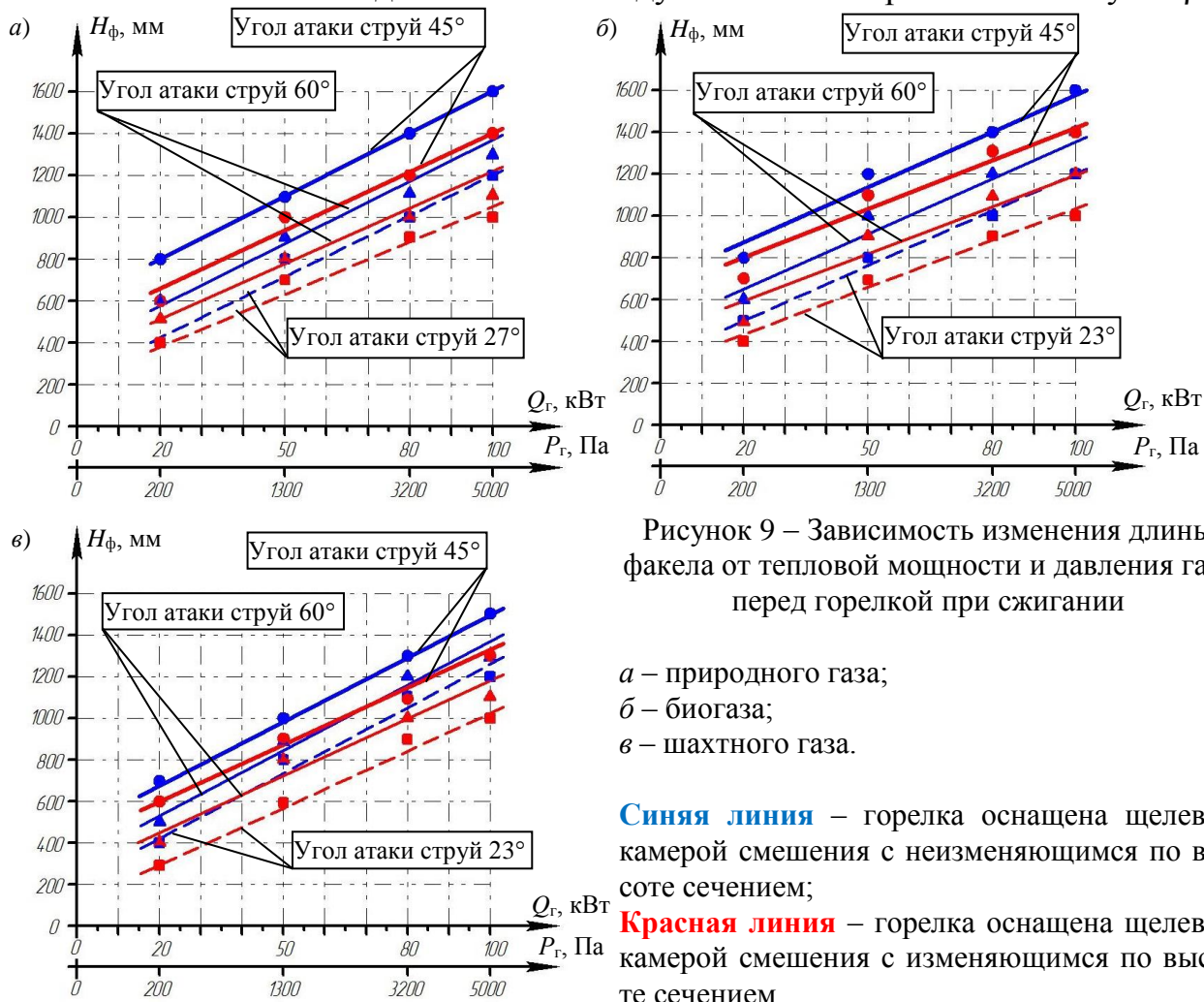


Рисунок 9 – Зависимость изменения длины факела от тепловой мощности и давления газа перед горелкой при сжигании

- a* – природного газа;
- b* – биогаза;
- v* – шахтного газа.

**Синяя линия** – горелка оснащена щелевой камерой смешения с неизменяющимся по высоте сечением;  
**Красная линия** – горелка оснащена щелевой камерой смешения с изменяющимся по высоте сечением.

Наименьшая длина факела будет наблюдаться при углах  $\beta$  соответствующих расчётным углам обеспечивающих наибольшую площадь контакта струй с воздухом, ускоряющей процессы смесеобразования ( $\beta = 27^\circ$  – для природного газа; для  $\beta = 23^\circ$  – для биогаза и шахтного газа).

После обработки графических зависимостей, представленных на рисунке 9 и рисунке 10 с учётом формы щелевой камеры смешения горелки были подобраны зависимости  $H_f = f(\beta, C)$  (3) и (4).

Для горелки с неизменяющимся профилем проходного сечения щелевой камеры может быть использована зависимость (3), для горелки, оснащённой щелевой камерой смешения с изменяющимся профилем проходного сечения может быть использована зависимость (4):

$$H_f = 1,1 \cdot \beta(90,9 - \beta) - C; \tag{3}$$

$$H_f = 0,8 \cdot \beta(93,8 - \beta) - C, \tag{4}$$

где  $\beta$  – угол атаки газовых струй поперечного набегающего потока воздуха;  
 $C$  – численное значение.

Численное значение  $C$  зависит от вида газа, давления газа и формы щелевой камеры смешения. Для определения численного значения  $C$  были получены графические и математические зависимости  $C = f(P_r)$  для двух форм щелевой камеры смешения. Математические зависимости представлены в таблице 3, а графические зависимости в диссертации.

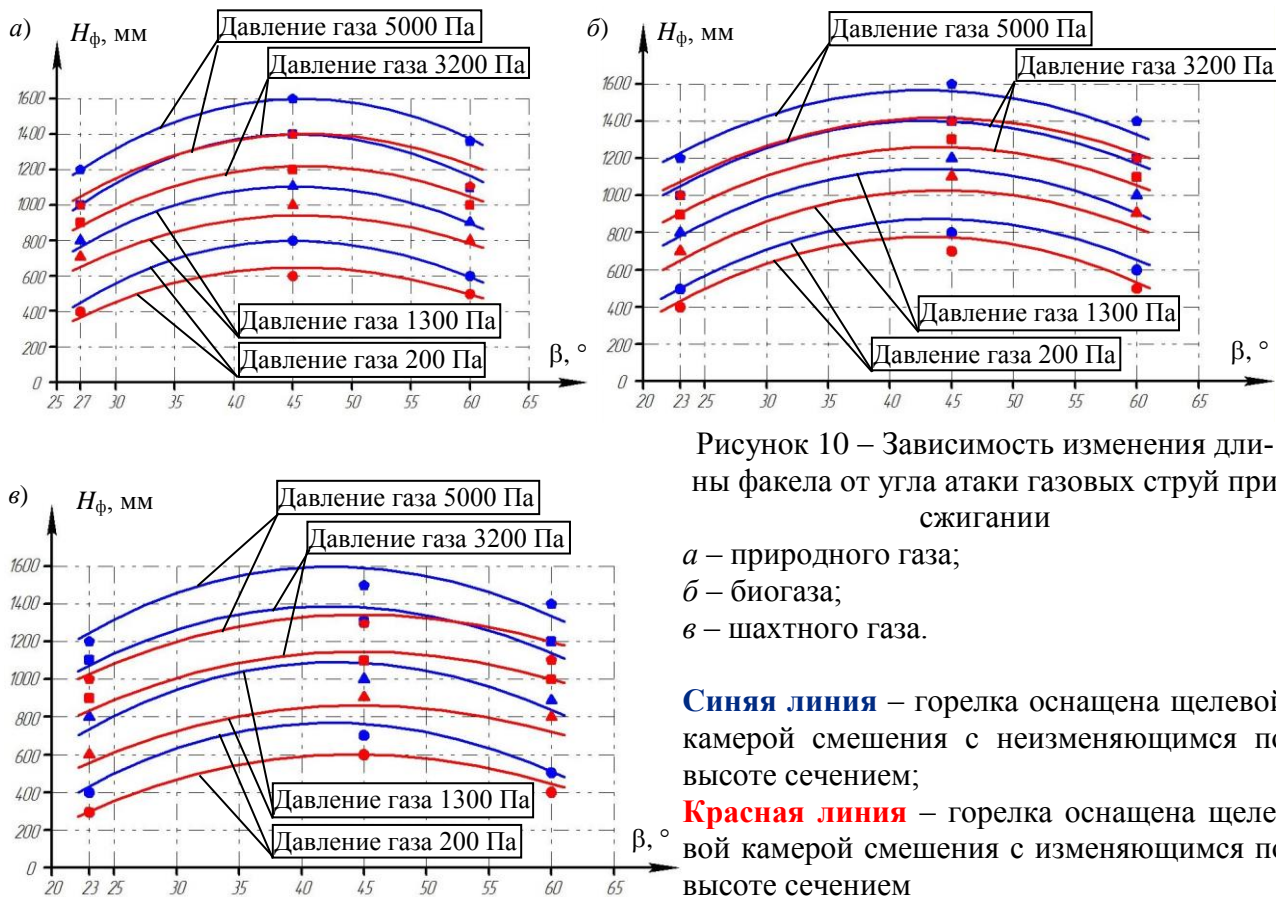


Рисунок 10 – Зависимость изменения длины факела от угла атаки газовых струй при сжигании

а – природного газа;  
 б – биогаза;  
 в – шахтного газа.

**Синяя линия** – горелка оснащена щелевой камерой смешения с неизменяющимся по высоте сечением;  
**Красная линия** – горелка оснащена щелевой камерой смешения с изменяющимся по высоте сечением

Таблица 3 – Функциональные зависимости расчётного численного значения  $C$

Вид газа	Форма профиля щелевой камеры смешения	
	Неизменяющийся по высоте профиль	Изменяющийся по высоте профиль
Природный газ	$C = 13,6(120,7 - \sqrt{P_r})$	$C = 12,4(107,8 - \sqrt{P_r})$
Биогаз	$C = 12,4(124,7 - \sqrt{P_r})$	$C = 10,8(103,7 - \sqrt{P_r})$
Шахтный газ	$C = 14,8(115,3 - \sqrt{P_r})$	$C = 10,5(152,5 - \sqrt{P_r})$

### 6. Влияние вида газа на распределение температурных полей по топочному объёму тепловой установки

В процессе исследования работы горелки при работе на природном газе, биогазе и шахтном газе с номинальной мощностью (100 кВт) были проведены замеры температуры продуктов сгорания по топочному объёму. Температуры замерялись термопарой в контрольных точках согласно разработанной карте, представленной в диссертации.

Измерения температуры производились для установившихся режимов ра-

боты УГГУ с углом атаки  $\beta$ , рассчитанным с учётом равномерного распределения струй в поперечном сечении щелевой камеры смешения и обеспечения максимальной площади контакта потоков ( $\beta = 27^\circ$  – для природного газа; для  $\beta = 23^\circ$  – для биогаза и шахтного газа). Температурные поля исследовались только для горелки, оснащённой щелевой камерой смешения с изменяющимся профилем проходного сечения. Такое решение было принято вследствие наличия у данного варианта горелки наиболее короткого факела.

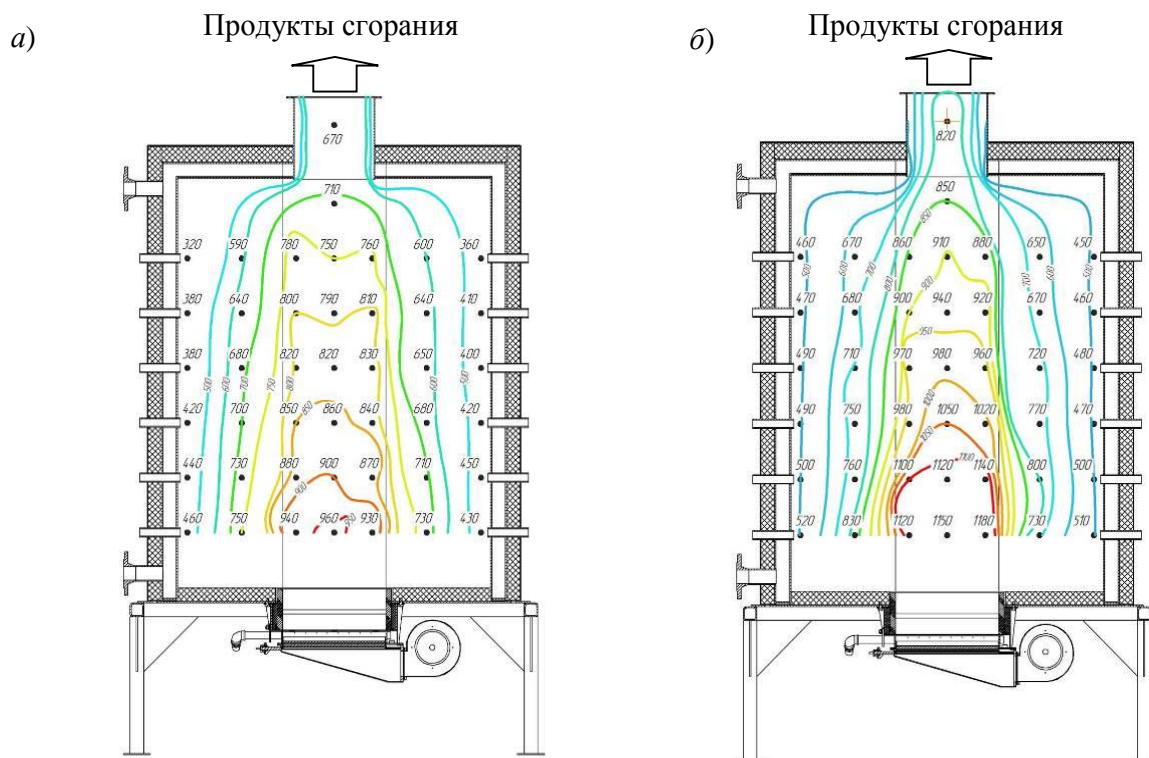


Рисунок 11 – Температурное поле продуктов сгорания в центральной продольной плоскости сечения топки

*a* – при сжигании биогаза; *б* – при сжигании шахтного газа

Распределение в топочном объёме температурных полей при сжигании природного газа, биогаза и шахтного газа происходит без наличия локальных зон с высокими температурными градиентами. Зона максимальных температур размещается строго над щелевой камерой смешения в центральной части фронта пламени. Зона полного выгорания газа размещается на высоте 1000 мм от верхнего края камеры смешения. Максимальные температуры при сжигании природного газа достигают  $1300^\circ\text{C}$ .

При сжигании биогаза (рисунок 11, *a*) температурный предел зоны максимальной температуры ниже, чем у природного газа и достигает порядка  $940\text{--}960^\circ\text{C}$ . Это объясняется более низкой теплотой сгорания и высокой забалластированностью негорючими компонентами.

При сжигании шахтного газа (рисунок 11, *б*) предельные значения температуры топочного пространства соответствуют диапазону  $1120\text{--}1150^\circ\text{C}$ .

Более высокие температуры горения для шахтного газа в сравнении с биогазом объясняются более низким расходом воздуха, подаваемого на горение.



### **III. ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ**

1. Разработана система теплогазоснабжения для сжигания нетрадиционных газов в УГГУ, обеспечивающая равномерность раздачи воздуха по сечению щелевой камеры смешения, а также устойчивое и полное сгорания газа в широком диапазоне изменения тепловых нагрузок. Разработаны и исследованы элементы системы теплогазоснабжения, позволяющие обеспечить:

- интенсивную подготовку горючей газозооушной смеси равномерного состава;
- равномерную скорость движения воздуха в щелевой камере смешения;
- равномерное распределение тепловых напряжений вдоль щелевой камеры смешения УГГУ;
- поддержание минимального  $\alpha$  для различных газов и тепловой мощности горелки при отсутствии химического недожога;
- возможность регулирования длины факела без изменения её тепловой мощности.

2. Усовершенствована методика расчета элементов системы теплогазоснабжения для сжигания нетрадиционных газов в УГГУ, обеспечивающих оптимальную длину факела и полноту сгорания в зависимости от угла  $\beta$ , от давления газа и профиля щелевой камеры смешения при сжигании природного газа, биогаза и шахтного газа, а также предложена система автоматизации УГГУ, способная регулировать и контролировать режимы работы горелки.

3. Получены экспериментальные зависимости влияния вида газа, угла  $\beta$  и тепловой мощности горелки при полном сгорании газа на изменения минимальных  $\alpha$ .

4. Определены аэродинамические режимы и разработаны конструкторские решения, влияющие на длину факела при сжигании газов.

5. Получены графические и математические зависимости влияния угла  $\beta$ , давления газа перед горелкой, формы профиля поперечного сечения щелевой камеры смешения и вида газа на длину факела и качество сгорания газа.

### **IV. ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**Научные статьи, опубликованные в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных Высшей аттестационной комиссией Министерства образования и науки Российской Федерации.**

1. **Яковлев, В. А.** Методика расчёта на ЭВМ щелевых газогорелочных устройств с принудительной подачей воздуха [Текст] / В. А. Яковлев // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2008. – №11. – С. 133 – 139. (0,64 п. л.);

2. **Яковлев, В. А.** Оптимизация расчёта горелок с принудительной подачей воздуха и щелевой камерой смешения [Текст] / В. А. Яковлев // Вестник гражданских инженеров. – 2016. – № 1(54). – С. 113 – 119. (0,8 п. л.);

3. **Яковлев, В. А.** Оптимизация воздухораспределительных систем газогорелочных устройств с принудительной подачей воздуха и щелевой камерой смешения методом математического моделирования [Текст] / В. А. Яковлев, Г.

П. Комина // Вестник гражданских инженеров. – 2016. – № 2(55). – С. 163 – 170. (0,9 п. л.);

4. **Яковлев, В. А.** Испытания работы газогорелочного устройства с принудительной подачей воздуха и щелевой камерой смешения на невзаимозаменяемых газах [Текст] [Электронный ресурс] / В. А. Яковлев / Электронный научный журнал «Фундаментальные исследования». – 2016. – № 9 – Ч. 2. Режим доступа: <http://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=40739> (дата обращения: 22.09.2016) (0,9 п. л.).

#### **Статьи в других изданиях**

5. **Яковлев, В. А.** Методика расчёта щелевых газовых горелок, применяемых в водотрубных котлах малой и средней мощности [Текст] / В. А. Яковлев // Актуальные проблемы современного строительства: сборник материалов 60-й Международной научно-технической конференции молодых учёных, Ч. I / М-во образования и науки РФ, С.-Петербург. гос. архитектур.-строит. ун-т. – СПб., 2007. – С. 172 – 176. (0,25 п. л.);

6. **Яковлев, В. А.** Результаты огневых испытаний элементов опытной щелевой горелки на газах с разной теплотой сгорания [Текст] / В. А. Яковлев, Г. Н. Северинец // Доклады 64-й научной конференции профессоров, преподавателей, научных работников, инженеров и аспирантов университета, Ч. II / М-во образования и науки РФ, С.-Петербург. гос. архитектур.-строит. ун-т. – СПб., 2007. – С. 115 – 119. (0,27 п. л.);

7. **Яковлев, В. А.** Расчёт конструктивных параметров щелевых газогорелочных устройств при помощи ЭВМ [Текст] / В. А. Яковлев // Доклады 65-й научной конференции профессоров, преподавателей, научных работников, инженеров и аспирантов университета, Ч. I / М-во образования и науки РФ, С.-Петербург. гос. архитектур.-строит. ун-т. – СПб., 2008. – С. 159 – 163. (0,23 п. л.);

8. **Яковлев, В. А.** Экспериментальные разработки водотрубного котла, оборудованного горизонтальной щелевой горелкой с принудительной подачей воздуха среднего давления [Текст] / В. А. Яковлев // Доклады 66-й научной конференции профессоров, преподавателей, научных работников, инженеров и аспирантов университета, Ч. II / М-во образования и науки РФ, С.-Петербург. гос. архитектур.-строит. ун-т. – СПб., 2009. – С. 166 – 170. (0,25 п. л.);

9. **Яковлев, В. А.** Сравнительный анализ газогорелочных устройств, применяемых в отопительных котлах малой мощности [Текст] / В. А. Яковлев, А. А. Крюков // Актуальные проблемы современного строительства: Сборник материалов 62-й международной научно-технической конференции молодых учёных, Ч. III / М-во образования и науки РФ, С.-Петербург. гос. архитектур.-строит. ун-т. – СПб., 2009. – С. 166 – 168. (0,16 п. л.);

10. **Яковлев, В. А.** Модернизация водотрубного отопительного котла с целью применения щелевого газогорелочного устройства / В.А. Яковлев // Доклады 67-й научной конференции профессоров, преподавателей, научных работников, инженеров и аспирантов университета, Ч. I / М-во образования и науки РФ, С.-Петербург. гос. архитектур.-строит. ун-т. – СПб., 2010. – С. 191 – 196. (0,31 п. л.);

11. **Яковлев, В. А.** Усовершенствование методики расчёта щелевых га-

зогорелочных устройств при помощи ЭВМ [Текст] / В. А. Яковлев // Энерго- и ресурсосбережение. Энергосбережение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: Сборник материалов Всероссийской студенческой олимпиады, научно-практической конференции и выставки работ студентов, аспирантов и молодых учёных 22 – 26 ноября 2010 г. / УрФУ. – Екатеринбург, 2010. – С. 219 – 221. (0,18 п. л.);

12. **Яковлев, В. А.** Аэродинамические исследования щелевого газогорелочного устройства с принудительной подачей воздуха среднего давления [Текст] / В. А. Яковлев // Доклады 68-й научной конференции профессоров, преподавателей, научных работников, инженеров и аспирантов университета, Ч. II / М-во образования и науки РФ, С.-Петерб. гос. архитектур.-строит. ун-т. – СПб., 2011. – С. 172 – 177. (0,25 п. л.);

13. **Яковлев, В. А.** Аэродинамические особенности проектирования смесеподготовительных систем щелевых ГГУ с принудительной подачей воздуха [Текст] / В. А. Яковлев // Актуальные проблемы строительства и архитектуры: Материалы международной научно-практической конференции студентов, аспирантов, молодых учёных и докторантов, Ч. II / М-во образования и науки РФ, С.-Петерб. гос. архитектур.-строит. ун-т. – СПб., 2012. – С. 138 – 141. (0,2 п. л.);

14. **Яковлев, В. А.** Особенности проектирования смесительной системы в щелевых ГГУ с принудительной подачей воздуха [Текст] / В. А. Яковлев // Развитие дорожно-транспортного комплекса и строительной инфраструктуры на основе рационального природопользования: Материалы VII Всероссийской научно-практической конференции ФГБОУ ВПО «СибАДИ» (с международным участием), Кн. 1 / СибАДИ. – Омск., 2012. – С. 390 – 394. (0,25 п. л.);

15. **Яковлев, В.А.** Оптимизация конструкции смесеподготовительных систем щелевых ГГУ с принудительной подачей воздуха [Текст] / В. А. Яковлев // Энерго- и ресурсосбережение. Энергосбережение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: Сборник материалов Всероссийской студенческой олимпиады, научно-практической конференции и выставки работ студентов, аспирантов и молодых учёных 18 – 21 декабря 2012 г. / УрФУ. – Екатеринбург., 2012. – С. 220 – 222. (0,18 п. л.);

16. **Яковлев, В.А.** Оптимизация конструкции системы подготовки газоздушной смеси в щелевых ГГУ с принудительной подачей воздуха [Текст] / В. А. Яковлев // Градостроительство. Инфраструктура. Коммуникации: Инженерные системы и сооружения. – 2014. – № 4. Воронеж – С. 84 – 90. (0,3 п.л).