МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»
Политехнический институт
Энергетический факультет
Кафедра «Промышленная теплоэнергетика»
Направление подготовки 13.06.01 «Электро- и теплотехника»

ВЫПУСКНАЯ НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА ПРОВЕРЕНА
Рецензент,
д.т.н., профессор
_____ Е.Б. Агапитов
«_____» _____ 2020 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой
«Промышленная теплоэнергетика»,
к.т.н., доцент
_____ К.В.Осинцев
«_____» _____ 2020 г.

**Совершенствование сжигания природного газа в инжекционных горелках**

ВЫПУСКНАЯ НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
ПО ПРОГРАММЕ АСПИРАНТУРЫ
«ПРОМЫШЛЕННАЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА»
ЮУрГУ–13.06.01.2020.755.01.ПЗ ВНКР

Руководитель
программы аспирантуры,
д.т.н., профессор
_____ М.М. Дудкин
«_____» _____ 2020 г.

Автор работы,
аспирант группы П-5504
_____ Д.Э. Качаров
«_____» _____ 2020 г

Челябинск 2020

# АННОТАЦИЯ

Качаров Д.Э. Совершенствование сжигания природного газа в инжекторных горелках. – Челябинск: ЮУрГУ, ПИ, Э; 2020, 120 с., 20 ил., библиогр. список – 153 наим., 28 слайдов презентация Power Point.

В выпускной научно-квалификационной работе (ВНКР) применено методическое и программное обеспечение предназначенное для создания компьютерных моделей процессов горения в атмосферных газовых горелках с целью графической и физической симуляции горения природного газа для решения следующих задач: в возможности использования разработанных моделей горелок в практической деятельности в конструкторских отделах проектных организаций в развитии использования систем теплогазоснабжения для сжигания углеводородных газов с использованием газовых горелочных устройств (ГГУ).

Описанное методическое и программное обеспечение предназначено для выполнения 2D/3D модели горелок; разработаны модели горения в программном комплексе Ansys Fluent; изложены основные итоги проведённых исследований, сформулированы полученные результаты и проведен анализ моделей горелок.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ……..... 6
1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ……..… 7
2 НАУЧНАЯ НОВИЗНА. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ ИССЛЕДОВАНИЯ..... 9
2.1 Газообразное топливо. Основные показатели……..…...… 9
2.2 Механизм горения газообразного топлива……..... 10
2.3 Устройство и принцип работы атмосферных газовых горелок..…..... 16
2.4 Методика и расчет конструктивных параметров атмосферных газовых горелок……..... 21
3 КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ПРОГРАММЕ ANSYS…..... 35
3.1 Обзор существующего программного обеспечения для моделирования процессов горения…….…... 35
3.2 Рабочая среда ANSYS Fluent……..... 39
3.3 Результаты компьютерного моделирования ……..... 55
3.3.1 Обоснование выбора конструктивных элементов ГГУ……...… 57
3.3.2 Исследование процесса горения в топке котла методом моделирования……..... 69
3.3.3 Моделирование теплового излучения……...… 71
3.3.4 Моделирование горения…….. 72
4. ПОЛУЧЕНИЕ И СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И РЕЗУЛЬТАТОВ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ…..... 80
4.1 Анализ результатов компьютерного моделирование и результатов горения на физических моделях……..... 80
4.2 Методика исследований энерго–экологических показателей работы каскадной котельной при отсутствии химического недожога……...…….. 80
4.3 Определение теплового баланса котла «Protherm KLOM»…….. 85
4.4 Энерго–экологические показатели работы горелки новой конструкции……..… 89
4.5 Результаты исследований потери теплоты в окружающую среду…….….. 94
5 ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ……..... 97
5.1 Введение……...…. 97
5.2 Расчет капитальных и текущих затрат…….…... 97
5.2.1 Исходные данные……..... 98
5.2.2 Смета капитальных затрат…….……..... 98
5.2.3 Годовые эксплуатационные расходы……...……..... 99
5.2.4 Расчет срока окупаемости проекта……..……..... 102
5.3 Модель причинно-следственной диаграммы…….. 103
5.4 SWOT-анализ вариантов технических решений..……... 104

5.5 Оценка движущих и сдерживающих сил и ресурсов проекта технического перевооружения котла…….....…..... 105
5.6 Планирование целей проекта технического перевооружения котла на ООО «АстанГаз» в дереве целей……...…..... 106
ЗАКЛЮЧЕНИЕ…….....… 110
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК……...… 111

# ВВЕДЕНИЕ

Последние десятилетия отмечены бурным ростом темпов добычи и потребления природного газа. Россия, где среднегодовая добыча в XXI веке составляет от 500 до 700 млрд. м$^3$, по этому показателю занимает первое место в мире (18 % всей мировой добычи, примерно 35 % мировых запасов).

На долю природного газа приходится примерно 42 % приходной части ТЭБ России. Основные месторождения сосредоточены в труднодоступных, малонаселённых районах с суровым климатом – Ямало-Ненецкий национальный округ, север Сибири, шельф Северного Ледовитого океана. Крупнейшие месторождение – Уренгойское (10 200 млрд. м$^3$, открыто в 1966 г.), Ямбургское (5 242 млрд. м$^3$ – 1969 г.), Бованенковское (4 385 млрд. м$^3$ – 1971 г.). Примерно половина газа расходуется внутри страны, вторая половина идёт на экспорт. Мировые цены на газ непрерывно растут. В коммунальной энергетике преимущественное использование получили природный газ и сжиженные пропан-бутановые смеси. Природный газ различных месторождений из трубопроводов высокого и среднего давлений после редуцирования в газовых регулирующих установках (ГРС, ГРП, ГРУ) поступает в газопроводы низкого давления [16].

Столь значимая доля природного газа в топливно-энергетическом балансе страны объясняется его высокими энергетическими качествами, стабильностью и экологичностью (относительной чистотой продуктов сгорания).

Поэтому перспективы применения газового топлива распространяются не только на крупную энергетику и коммунально-бытовой сектор, но и на транспорт (автомобильный, авиационный) и такие отрасли как чёрная и цветная металлургия, химическая промышленность, сельское хозяйство и др.

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 углеводородных газов в системах теплогазоснабжения [1].

Экономичность сжигания газа требует совершенствования существующих и разработки новых конструкций горелочных устройств.

Имеющиеся отечественные газогорелочные устройства не всегда позволяют эффективно и экономично реализовывать сжигание газа, поэтому в данной работе рассматриваются актуальные способы совершенствования процессов горения в атмосферных газовых горелках с применением современного программного обеспечения.

# 1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

Проведен анализ исследований советских и зарубежных авторов, посвященный применению программного обеспечения для анализа сжигания газообразного топлива в горелках котлов.

В работах Жильцова Ю.В., Елшина В.В., Равича М.Б., Сигала И.Я., Шаблий Л.С.: «Изучение процессов гомогенного горения предварительно несмешанных компонентов в ANSYS Fluent», применены практические алгоритмы для моделирования процессов горения в атмосферных горелках с учетом создания сеточной модели и дальнейшего применения аппаратных средств CFD-пакета ANSYS Fluent, который является передовым в сфере специальных программ расчета горения природного газа.

Использование современных компьютерных технологий позволяет достичь высоких практических и экономических результатов в различных областях промышленности. Появляется все большее количество разнообразных программ компьютерного моделирования, адаптированных к задачам строительства. Также совершенствуется аппаратная часть вычислительных машин, что позволяет разрабатывать сложные ресурсоемкие проекты, характерные для теплотехники. Одна из наиболее распространенных классификаций такого программного обеспечения формируется исходя из целей, которые достигаются в процессе использования того или иного программного продукта. Так, можно выделить две общие группы комплексов: CAD-системы (Computer-Aided Design) и CAE-системы (ComputerAided Engineering). CAD-системы представляют собой программные комплексы (ПК), предназначенные для автоматизации процесса проектирования.

Основная цель CAD-систем заключается в оптимизации и повышении эффективности труда проектировщика, возможности использовать набор инструментов и технологий для подготовки проектных чертежей и 3D моделей. Примерами CAD-систем являются такие продукты, как AutoCAD, Revit, SolidWorks, Компас. CAE-системы предназначены для моделирования и анализа разнообразных физических процессов, таких как нагружение балки, горение газа, течение воздуха в вентиляционных шахтах и т. д. Большинство современных CAE-систем основано на полных математических моделях, представляющих собой системы уравнений в частных производных, которые решаются с помощью методов конечных разностей, конечных объемов (МКО) и конечных элементов (МКЭ).

Часто CAD- и CAE-системы используются совместно как дополняющие друг друга этапы процесса моделирования. Поэтому разработчики стремятся объединить в одном ПК свойства обеих систем или создать эффективные механизмы взаимодействия, интеграции и обмена данными между ними. Наиболее известными CAE-комплексами, позволяющими решать задачи проектирования и исследования теплотехнических процессов, являются ANSYS, NASTRAN, LS-DYNA, ABAQUS и т. д.

Принимая во внимание широкий спектр программ для расчета задач теплотехнического спектра, рассмотрим возможности и принципы работы конечно-элементного комплекса ANSYS, который объединяет и связывает множество приложений для расчета задач механики деформируемого твердого тела, газодинамики и электромагнетизма. На сегодняшний день ANSYS является одним из наиболее полных и эффективных по своему инструментарию программных комплексов. ПК ANSYS позволяет проводить численный анализ задач механики сплошной среды и предоставляет широкие возможности для подготовки расчетных геометрических и конечно-элементных моделей и последующей обработки результатов расчета. ANSYS FLUENT - программный модуль, обладающий обширным функционалом в области вычислительной динамики жидкостей и газов, позволяющим углубить процесс разработки и повышения эффективности любых изделий, имеет широкий спектр возможностей моделирования с учетом турбулентности, теплообмена, химических реакций. Данный модуль полностью интегрирован в рабочую среду ANSYS Workbench - платформу, объединяющую весь набор средств инженерного моделирования компании ANSYS. В рамках платформы ANSYS Workbench можно получить доступ к общим для всех расчетов инструментам, таким как инструменты для работы с геометрией и с сеткой ANSYS Meshing. Модуль ANSYS CFD-Post может быть использован для сравнения результатов и выполнения заключительного анализа данных.

Актуальность темы исследования заключается в разработке 2D/3D моделей горелочных труб атмосферных горелок в программном комплексе SolidWorks, с последующим построением физических образцов, выполненных по этим моделям и последующим анализом результатов горения горелочных труб в программе Ansys Fluent [48].

Практическая значимость работы заключается в использования полученных результатов для совершенствования методов сжигания газа, применяемых в практической деятельности конструкторских и проектных организаций.

## 2 НАУЧНАЯ НОВИЗНА. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Научная новизна проделанной работы заключается в создании полной процедуры анализа горения природного газа в атмосферных газовых горелках, включая математический расчет параметров горелочных труб с построением объемных 2D/3D моделей в программе SolidWorks, воплощения результатов в физических образцах. На основании объемных моделей, полученных при компьютерном моделировании, удалось создать в физические образцы, соответствующие полученным математическим параметрам. Используя полученный комплекс Ansys Fluent, были получены оценочные результаты горения каждой трубы с построением графической зависимости по каждой горелочной трубе. Дальнейший анализ данных полученных в Ansys Fluent показал эффективность сжигания природного газообразного топлива на каждом физическом образце.

### 2.1 Газообразное топливо. Основные показатели

Газообразное топливо разделяется на природные и искусственные и представляет собой смесь горючих и негорючих газов, содержащих количество водяного пара, а иногда и пыль, и смолы. Количество газового топлива выражается в кубических метрах при стандартных условиях (760 мм. рт. ст. и 0 °С), а состав – в процентах по объему. Под составом топлива понимают его состав сухой газообразной части [1].

Наиболее распространенным газообразным топливом является природный газ с высокой теплотворной способностью. Основными горючими составляющими большинства газообразных топлив являются предельные углеводороды: метан $CH_4$, содержание которого в большинстве природных газов составляет 90–98 % по объёму, этан $C_2H_6$, пропан $C_3H_8$, бутан $C_4H_{10}$, пентан $C_5H_{12}$, а также водород $H_2$, оксид углерода CO и сероводород $H_2S$ (в редких случаях и в очень малых количествах). Преобладающее содержание метана в природных газах обуславливает близость их физических свойств и теплотехнических характеристик.

Метан $CH_4$ является наиболее легким из углеводородов, не имеет ни цвета, ни запаха [4].

При полном сгорании метана, образуются двуокись углерода и водяной пар, согласно реакции (1):

$$H_4 + O_2 = CO_2 + H_2O. \quad (1)$$

Как уже было отмечено, метан является основным компонентом любого природного газа, а также содержится и в большинстве искусственных газов [2].

Плотность природных газов близка к плотности основного компонента – метана и изменяется, как правило, в узких пределах от 0,7 до 0,8 кг/м$^3$. В состав природного газа могут входить более тяжелые углеводороды – гомологи метана.

## 2.2 Механизм горения газообразного топлива

Сжигание газа осуществляется в атмосферном воздухе, состоящем из окислителя – кислорода $O_2$ (21%-ного) и инертного, не участвующего в горении азота $N_2$ (79%-ного). Теоретически необходимое для полного сжигания горючих компонентов газа количество воздуха рассчитывается по составу газа и для природного газа различных месторождений составляет 8,5–10 м$^3$, а для сжиженного газа объём равен 24–30 м$^3$ [4].

Теплота сгорания 1 м$^3$ сухого газа при нормальных условиях для большинства внутренних месторождений 33,29 – 35,87 МДж/м$^3$ (7 946 – 8 560 ккал/м$^3$) [5].

Состав сухого горючего газа (в процентах по объему) выражается согласно реакции (2):

$$CO + H_2 + 2C_m H_n + H_2S + CO_2 + O_2 + N_2 = 100\ \%. \qquad (2)$$

Негорючая часть сухого газообразного топлива – балластного – представляет собой азот и диоксид углерода $CO_2$ [4-6].

Состав влажного топливного газа выражается согласно реакции (3):

$$CO + H_2 + \sum C_m H_n + H_2S + CO_2 + O_2 + H_2 + H_2O = 100\ \%. \qquad (3)$$

Механизм горения газообразного топлива протекает по разному в зависимости от теплофизических свойств отдельных компонентов. Теплоустойчивые компоненты, к которым относятся, например CO, $H_2$, сохраняют свою молекулярную структуру при высокотемпературном нагреве без доступа воздуха. Тепло неустойчивые компоненты, например, большинство предельных углеводородов метанового ряда, при нагревании без доступа воздуха разлагаются с образованием более лёгких соединений и атомов углерода. Температура начала термической диссоциации углеводородов уменьшается с увеличением их молекулярной массы. Например, термическое разложение метана $CH_4$ начинается при температуре 600–800 ºС, этана $C_2H_6$ – при 485 ˚С, пропана $C_3H_8$ – при 400 ˚С.

Пиролиз природных газов, содержащих некоторое количество тяжёлых фракций, начинается уже при температурах 300–400 ˚С и протекает по сложной цепной схеме преобразований. Выделяющиеся в результате пиролиза атомы углерода имеют четыре свободные связи, отдельно не существуют и в зонах недостатка кислорода соединяются между собой, образуя твёрдые кристаллы графита – мельчайшие частицы сажи размером 0,3–0,4 мкм. В зоне активного горения они раскаляются, образуя ярко светящийся факел. Температура воспламенения газа несколько ниже температуры термического разложения углеводородов. Поэтому при хорошем смесеобразовании, когда все молекулы горючего вступают в контакт с необходимым для полного горения количеством молекул окислителя, образуется сравнительно небольшое количество углеродных частиц, которые, попадая в зону с достаточным содержанием

кислорода, быстро сгорают. При этом длина светящейся части факела незначительна.

Классический закон действующих масс и закон Аррениуса устанавливают зависимость скорости химической реакции от концентрации реагирующих веществ и температуры. Согласно закону действующих масс (4), в закрытой гомогенной системе при постоянной температуре скорость химической реакции в каждый момент времени пропорциональна произведению концентраций реагирующих веществ.

$$W = k \cdot C^a \cdot C^b, \tag{4}$$

где $W$ – скорость реакции;

$k$ – константа скорости реакции, характеризующая число эффективных столкновений молекул, приводящих к реакции;

$C^a \cdot C^b$ – концентрации реагентов $a$ и $b$;

$a$ и $b$ – стехиометрические коэффициенты в уравнении реакции.

Константа скорости реакции согласно закону Аррениуса, указанному в формуле (5), является функцией температуры.

$$k = k_0 \cdot exp(-E/RT), \tag{5}$$

где $k_0$ – вероятностный фактор - коэффициент пропорциональности, характеризующий полное число столкновений всех молекул (активных и неактивных) в единице объёма реагирующей смеси;

$k$ – константа скорости реакции;

$E$ – энергия активации, Дж/моль;

$T$ – температура, К;

$R$ – молярная газовая постоянная 8,31 Дж/моль×К.

Множитель *exp(–E/RT)* отражает долю общего числа столкновений, которые возникают между «активными» молекулами и приводят к реакции.

Однако эти представления отражают лишь чисто молекулярный механизм протекания реакции, подчиняющийся стехиометрическим соотношениям исходных и конечных продуктов.

В ряде случаев горение газообразных веществ не подчиняется этим законам. Например, реальные скорости горения часто значительно выше, чем это следует из сложившихся представлений, а энергия активации соответствующих реакции много ниже.

Результирующие реакции горения дают представления только о конечных результатах сгорания отдельных составляющих, не отражая фактического хода процесса горения. В действительности механизм горения газа более сложен и характеризуется наличием ряда промежуточных химических преобразований,

которые в целом представляют собой разветвлённые цепные реакции. Согласно учению академика Н.Н. Семёнова, в ходе реакции активные молекулы могут порождать новые активные молекулы или ионы (радикалы) в большем количестве, чем исходные. Таким образом, количество активных центров реакции лавинообразно нарастает, пока какое-либо внешнее обстоятельство не прервёт эту цепь [6].

В процессе реакции возникают промежуточные продукты, имеющие более низкие энергии активации, в результате чего цепочка промежуточных реакций протекает с большими скоростями. При этом активными центрами реакции наряду с молекулами исходных веществ с энергией, превышающей энергию активации, могут быть и отдельные радикалы (ионы), являющиеся осколками исходных молекул, и даже конечные продукты. Радикалы с ненасыщенными валентностями не требуют затрат энергии на разрыв старых связей. Соответственно для них энергия активации оказывается значительно ниже, чем энергия исходных молекул с насыщенными валентностями [124-127].

Процесс горения газа состоит из следующих стадий:

– смешение газа с воздухом;

– нагрев полученной смеси до температуры воспламенения;

– зажигание и реакция горения, сопровождающаяся выделением тепла.

В некоторых случаях необходимо достижение определённых дополнительных условий по характеру тепловыделения в факеле: иногда требуется короткое пламя, в других случаях – длинное.

Газовые пламенна могут быть классифицированы по следующим признакам:

– в зависимости от режима движения – ламинарный и турбулентный факел;

– по способу образования горючей смеси – гомогенный и диффузионный факел;

– по геометрии факела – свободный и ограниченный;

– по аэродинамической схеме движения – спутный и встречный факел.

На интенсивность и полноту горения, а также на характеристику факела (размер, светимость, температурный уровень) первостепенное значение оказывает фактор смешения топлива с окислителем. При недостаточно интенсивном перемешивании газа с воздухом окислительные реакции тормозятся. При этом возможно появление продуктов неполного горения (химический недожог) и продуктов термического разложения углеводородов (механический недожог). Во избежание химического недожога при плохом перемешивании требуется увеличение коэффициента избытка воздуха в топке, что приводит к росту потерь теплоты с уходящими газами и, как следствие, к снижению КПД котла или другой теплотехнической установки [6, 7, 122, 123].

Если теплопотери в зоне горения, связанные с теплообменом с окружающей средой, превышают тепловыделение, то горение невозможно.

Газовоздушные (газокислородные) смеси являются горючими только в определённом диапазоне соотношения отдельных компонентов. Любой горючий газ (смесь газов) характеризуется температурой воспламенения, существенно зависящей от условий протекания процесса теплоотдачи, а также нижним и

верхним концентрационными пределами распространения пламени, зависящими от ряда факторов (температуры, давления, содержания примесей и т. п.). На практике процесс сжигания топлива осуществляется в устройствах (топки, печи, камеры сгорания и др.), отличающихся весьма сложными аэродинамическими характеристиками. При этом ни одно современное топочное устройство не совершенно с аэродинамической точки зрения, т. е. не может обеспечить идеальное (на молекулярном уровне) смешение топлива и окислителя (воздуха). При высоких температурах и концентрациях исходных компонентов (топливо и окислитель), при достаточной активности составляющих горючей смеси химическая реакция протекает согласно закону Аррениуса со столь значительной скоростью в соответствии с рисунком 2.1, кривая 1 (скорость реакции пропорциональна величине *exp(–E/RT)*), что процессы смесеобразования, указанные на рисунке 2.1 (кривая 2), отстают по скорости протекания от химической реакции горения и тем самым тормозят процесс сжигания.

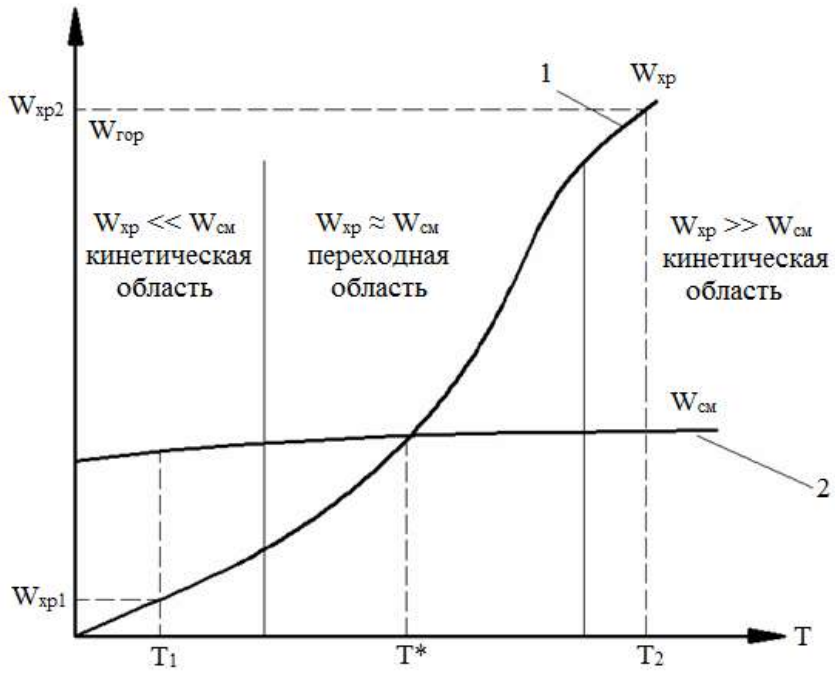


Рисунок 2.1 – Кинетическая и диффузионная области горения

В общем случае полное время сгорания $\tau_{гор}$ складывается из трёх составляющих, согласно формуле (6):

$$\tau_{гор} = \tau_{см} + \tau_{наг} + \tau_{хим}, \quad (6)$$

где $\tau_{см}$ – время, необходимое для возникновения физического контакта между горючим и окислителем (при сжигании газа – время смесеобразования);

$\tau_{наг}$ – время нагрева горючей смеси до температуры воспламенения;

$\tau_{хим}$ – время протекания самой химической реакции.

Как бы ни было совершенно ГГУ, его работа в режимах, соответствующих подаче на горение теоретически необходимого объема воздуха, сопровождается потерями от химической неполноты горения [8, 121]. Взаимная диффузия топлива и окислителя при образовании газовоздушной смеси затрудняется наличием балластных газов и образующихся продуктов сгорания, что объясняет необходимость работы ГГУ с большими расходами воздуха на горение. Соотношение действительного количества воздуха, поступающего на горение и теоретически необходимого, определяется коэффициентом избытка воздуха согласно формуле (7):

$$\alpha = V_{д}/V_0, \tag{7}$$

где $\alpha$ – коэффициент избытка воздуха на входе в топку;

$V_{д}$ – количество воздуха, действительно подаваемого в топку;

$V_0$ – теоретически необходимое количество воздуха.

Воспламенить гомогенную смесь природного газа и воздуха можно только в том случае, если соотношение газ-воздух находится между нижней (смесь «бедная», концентрация газа более 5,3 %, т. е. $\alpha \leq 1{,}8$) и верхней границей воспламенения (смесь «богатая», концентрация газа менее 14 %, т. е. $\alpha > 0{,}65$). Результирующее значение коэффициента избытка воздуха для всех типов горелочных устройств $\alpha > 1$ и для атмосферных ГГУ, при работе с номинальной нагрузкой, находится в эксплуатационном диапазоне $\alpha$ = 1,05 – 1,25. Значение коэффициента избытка воздуха на работающем котле может быть определено на основании результатов газового анализа продуктов сгорания по содержанию в них кислорода $O_2$ (%) или углекислого газа $CO_2$ (%). Для природного газа среднего состава соотношение концентраций $O_2$ и $CO_2$ в продуктах полного сгорания в зависимости от коэффициента избытка воздуха, а также значения теоретической (калориметрической) температуры горения и полного объема продуктов, указаны в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Значения теоретической (калориметрической) температуры горения и полного объема продуктов сгорания природного газа

| Коэффициент избытка воздуха, $\alpha$ | Природный газ среднего состава | | | |
|---|---|---|---|---|
| | $CO_2$, % | $O_2$, % | Теоретическая температура горения, °С | Объем продуктов сгорания, м$^3$/м$^3$ |
| 1,00 | 11,80 | 0,00 | 2010 | 10,52 |
| 1,05 | 11,20 | 1,00 | 1940 | 11,00 |
| 1,10 | 10,70 | 1,95 | 1890 | 11,48 |
| 1,15 | 10,20 | 2,80 | 1820 | 11,96 |
| 1,20 | 9,80 | 3,60 | 1780 | 12,43 |
| 1,25 | 9,40 | 4,20 | 1730 | 12,91 |

Для сжиженного газа соотношение концентраций $O_2$ и $CO_2$ в продуктах полного сгорания в зависимости от коэффициента избытка воздуха, а также значения теоретической (калориметрической) температуры горения и полного объема продуктов, указаны в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Значения теоретической (калориметрической) температуры горения и полного объема продуктов сгорания сжиженного газа

| Коэффициент избытка воздуха, $\alpha$ | Сжиженный газ среднего состава | | | |
|---|---|---|---|---|
| | $CO_2$, % | $O_2$, % | Теоретическая температура горения, °С | Объем продуктов сгорания, $м^3/м^3$ |
| 1,00 | 14,00 | 0,00 | 2110 | 29,60 |
| 1,05 | 13,50 | 1,20 | 2030 | 30,97 |
| 1,10 | 12,60 | 2,10 | 1970 | 32,34 |
| 1,15 | 12,10 | 2,85 | 1910 | 33,71 |
| 1,20 | 11,50 | 3,75 | 1835 | 35,08 |
| 1,25 | 11,20 | 4,20 | 1800 | 36,45 |

Как следует из приведенных данных в таблице 2.1 и таблице 2.2, разбавление продуктов сгорания избыточным воздухом (с ростом $\alpha$) приводит к снижению теоретической температуры горения топлива и, следовательно, к снижению интенсивности теплообмена в топке теплогенератора, а также к увеличению объема продуктов сгорания и, как следствие, к росту потерь теплоты с уходящими газами. Поэтому вполне оправданным является стремление работать с минимальными значениями коэффициента избытка воздуха. Однако эффективность работы конкретного ГГУ определяется не столько значением эксплуатационного коэффициента избытка воздуха, сколько полнотой сжигания горючих компонентов газа. Продукты неполного сгорания в дымовых газах оксид углерода CO, метан $CH_4$, водород $H_2$ – не только загрязняют окружающую среду, но являются также прямыми потерями химической энергии топлива. Именно значение потерь от химической неполноты горения топлива в первую очередь определяет значение эксплуатационного коэффициента избытка воздуха ГГУ [8, 9].

Рассмотрим случаи, когда тот или иной процесс (смесеобразование, нагрев, химическая реакция) становится определяющим фактором при определении суммарной скорости горения.

Если время смесеобразования несоизмеримо больше времени, необходимого для прогрева и протекания химической реакции, т. е. $\tau_{см} >> \tau_{хим}$ и $\tau_{см} >> \tau_{наг}$, то практически $\tau_{гор} = \tau_{см}$. Поскольку процессы смесеобразования определяются законами молекулярной и турбулентной диффузии, то подобный процесс называется диффузионным горением. Т. е. это означает, что процесс горения протекает в диффузионной области [26].

Примером такого процесса является горение предварительно неподготовленной газовоздушной смеси, т. е. когда газообразное топливо подаётся в топку не

перемешанным с окислителем. В этом случае смешение протекает уже непосредственно в топочном объёме, а время смешения значительно превышает время протекания химической реакции.

Развитый процесс горения, сопровождающийся, как правило, большим удельным тепловыделением (к которым можно отнести сжигание природного газа), протекает как раз в диффузионной области, поскольку химическая реакция окисления горючих составляющих газа при высоких температурах протекает практически мгновенно.

Если время смесеобразования и время нагрева, наоборот, несоизмеримо меньше времени, необходимого для протекания химической реакции, т. е. $\tau_{см} + \tau_{наг} < \tau_{хим}$, то практически $\tau_{гор} = \tau_{хим}$. Таким образом, фактором, определяющим скорость горения, является скорость химической реакции, которая, в свою очередь, описывается законами химической кинетики. Это означает, что процесс протекает в кинетической области [11, 120].

Примером кинетического горения является введение в топку заранее подготовленной гомогенной горючей смеси при температуре, близкой к температуре воспламенения.

В начальный период времени, когда температура ещё не высока, горение также протекает в кинетической области.

Таким образом, организация процесса сжигания топлива в воздушном потоке может основываться на двух различных принципах: кинетическом и диффузионном.

## 2.3 Устройство и принцип работы атмосферных газовых горелок

Важной задачей при эксплуатации котельного оборудования является экономичное сжигание природного газа. Процесс горения в котлах малой и средней мощности возможно сделать более экономичным, увеличив паспортный (заводской) КПД, не увеличивая при этом расход природного газа (от паспортного). Одним из методов для достижения такого результата, является подготовка воздуха перед горением. Подготовка воздуха это - выравнивание его общей и неравномерной по площади сечения воздуховода турбулизации и достижение равномерного распределения воздушного потока в общей площади сечения воздуховода и одновременно, разделению воздушного потока на множество мелких турбулизованных, но равных по объему и давлению потоков воздуха, перед подачей в горелочное устройство [10, 11]. В результате в смесительной части горелочного устройства, подготовленный воздух лучше смешивается с природным газом, что должно привести к сгоранию природного газа в топке котла с минимальным избытком воздуха и снижению температуры горения ядра факела. Важнейшим функциональным элементом, который может в значительной степени воздействовать на процессы, протекающие в топочном пространстве котлоагрегата, является горелка. Большинство газовых горелок независимо от их типа имеет общие конструктивные элементы: устройства для подвода газа и

воздуха (топлива и окислителя), смесительную камеру, горелочный насадок и стабилизирующее устройство.

Конструкция и аэродинамические характеристики горелочных устройств при сжигании такого высококалорийного топлива, каким является природный газ, играют первостепенное значение, поскольку большая разница в объёмах воздуха и газа существенно затрудняет их перемешивание (в связи с высокой теплотой сгорания соотношение расходов воздуха и газа с учётом коэффициента избытка воздуха равно 10). Кроме того, назначением горелки является организация смесеобразования и создание у её устья устойчивого фронта воспламенения для зажигания выходящей из горелки газовоздушной смеси.

Газовые горелки должны удовлетворять следующим требованиям:

1) Обеспечивать полноту сгорания газа. Содержание окиси углерода в сухих продуктах сгорания < 0,15 % по объему при коэффициенте избытка воздуха $\alpha$ = 1 и принудительном отводе продуктов сгорания в дымоотводящий канал.

2) Обеспечивать полное сжигание заданного количества газа с минимальным для данного типа горелок избытком воздуха.

3) Обеспечивать подвод в зону горения требуемого количества газа или газовоздушной смеси.

4) Обеспечивать высококачественное смешение газа с воздухом при принятом методе сжигания.

5) Создавать необходимую температуру, как в зоне горения, так и в камере сгорания в целом.

6) Обеспечивать возможность плавного регулирования тепловой мощности, т. е. теплоты, выделяемой в единицу времени.

7) Иметь для данного типа горелок максимальный коэффициент их предельного регулирования по тепловой мощности; последний является отношением максимальной тепловой мощности к минимальной. Максимальная тепловая мощность составляет 0,9 мощности, соответствующей верхнему пределу устойчивости работы горелки, минимальная — 1,1 мощности, соответствующей нижнему пределу устойчивости. Верхний предел устойчивости определяется отрывом пламени при работе горелки выше этого предела, а нижний — проскоком пламени при работе ниже этого предела.

8) Иметь уровень шума, не превышающий 72 дБ на расстоянии 1 м от горелки и на высоте 1,5 м от пола.

9) Иметь удобную для монтажа конструкцию, минимальную массу и габариты при соблюдении всех предыдущих условий.

10) Иметь насадку, соответствующую форме камеры сгорания.

В рамках этой работы мы рассмотрим атмосферные газовые горелки.

Атмосферные газовые горелки в качестве главной своей характеристики имеют то, что воздух в них засасывается (инжектируется) извне. В атмосферной (инжекционной) газовой горелке через эжектор подается газообразное топливо, которое благодаря тяге тянет за собой воздух из окружающего пространства, далее эта смесь поступает через отверстия в камеру сгорания, где воспламеняется.

Приготовление же газовоздушной смеси осуществляется уже непосредственно в теле самой горелки согласно рисунку 2.2.

Газовое горелочное устройство данного типа осуществляет нагнетание воздуха за счет энергии воздушной струи, нагнетая внутри горелки давление, близкое к атмосферному [28].

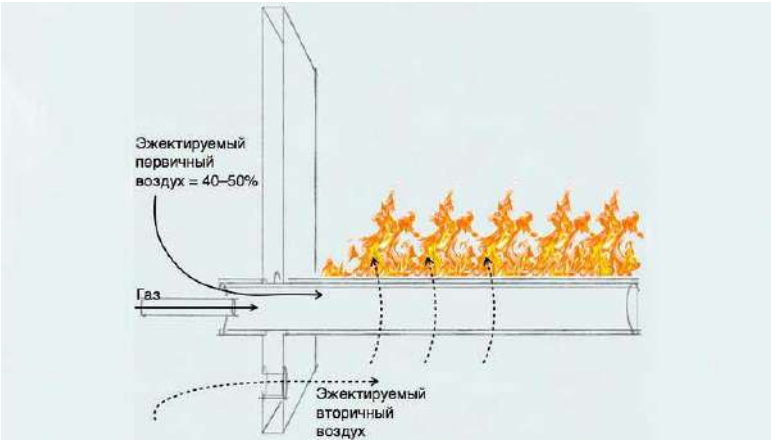


Рисунок 2.2 – Инжекционный принцип работы

Газовые атмосферные инжекционные горелки полного смешения, имеющие также название горелки среднего давления, образуют короткий единоразовый факел, проводя сжигание газа в количестве минимального топочного объема. Газовые же атмосферные инжекционные горелочные устройства низкого давления обеспечивают лишь подачу первичного количества воздуха в горелку. Остальной воздух, необходимый для сгорания газа нагнетается за счет подсасывания, ставшего возможным за счет разрежения, присутствующего в топках. В топках, имеющих большой объем, используют блочные конструкции, которые имеют в своем составе два и более горелочных устройства согласно рисунку 2.3.

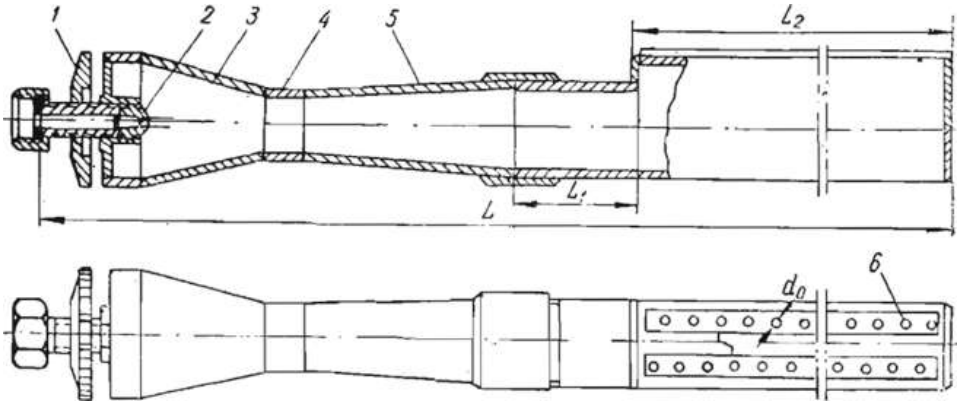


Рисунок 2.3 – Инжекционная многофакельная горелка

В горелках полного смешения (с газом перемешивается весь необходимый для горения воздух), работающих на газе среднего давления, образуется короткий

факел пламени, а горение завершается в минимальном топочном объёме. В инжекционные газовые горелки частичного смешения поступает только часть (40—60 %) требующегося для горения воздуха (т. е. первичный воздух), который и смешивается с газом. Остальное количество воздуха (т. е. вторичный воздух) поступает к факелу пламени из атмосферы за счёт инжектирующего действия газовоздушных струй и разрежения в топках [12, 118, 119].

В отличие от инжекционных газовых горелок среднего давления, в горелках низкого давления образуется однородная газовоздушная смесь с содержанием газа больше верхнего предела воспламенения; эти газовые горелки устойчивы в работе и имеют широкий диапазон тепловой нагрузки.

Атмосферные горелки должны в заданных пределах изменения производительности должна обеспечивать устойчивое зажигание и стабилизацию фронта воспламенения. Под стабилизацией факела подразумевается создание условий, обеспечивающих надёжное горение факела без погасаний, пульсаций или отрыва от горелки.

Под стабилизацией факела подразумевается создание условий, обеспечивающих надёжное горение факела без погасаний, пульсаций или отрыва от горелки.

Факел считается устойчивым, если при установившемся режиме подачи топлива он стабилизируется вблизи устья горелки и не меняет своего среднего положения в пространстве. Это состояние факела является результатом взаимодействия скорости распространения пламени и противодействующей ей скорости потока газовоздушной смеси, вытекающей из устья горелки. Если скорость потока газовоздушной смеси превышает скорость распространения пламени, явление втягивания пламени в горелку, или так называемого проскока пламени, невозможно. При этом, если скорость истечения газовоздушной смеси чрезмерно высока, смесь не успевает в достаточной степени прогреться за счёт рециркуляции продуктов сгорания к корню факела, и происходит отрыв факела.

Качественные границы устойчивости пламени в зависимости от степени аэрации горючей смеси, т. е. коэффициента избытка воздуха в горелке $\alpha_{\text{гор}}$ (доли первичного воздуха) и скорости истечения газовоздушной смеси [29, 117].

Нижний предел устойчивости горения изменяется по кривой, напоминающей закон изменения скорости горения в зависимости от концентрации газовоздушной смеси. Верхний предел устойчивого горения с увеличением $\alpha_{\text{гор}}$ резко снижается. Как видно, устойчивое горение в широком диапазоне скоростей наблюдается лишь при малом количестве первичного воздуха в исходной горючей смеси. В этом случае устойчивость горения обеспечивается хорошим источником воспламенения – диффузионным факелом, возникающим в камере при горении газа за счёт вторичного воздуха. С увеличением $\alpha_{\text{гор}}$ (доли первичного воздуха) пределы устойчивого горения сокращаются, т. к. влияние диффузионного фронта воспламенения нивелируется. При $\alpha_{\text{гор}}$ = 1, т. е. когда диффузионное горение вообще отсутствует, горение смеси устойчиво лишь в очень узком диапазоне

изменения скорости истечения газовоздушного потока $W_{пот}$, показанного на рисунке 2.4.

Рисунок 2.4 – График зависимости устойчивости горения

В таких случаях для предотвращения отрыва пламени от горелки необходимо повысить температурный уровень в области воспламенения газовоздушной смеси, например, с помощью закручивания потоков, обеспечивающего подсос раскалённых продуктов сгорания к корню факела в приосевой зоне (зона внутренней рециркуляции дымовых газов) [13].

В итоге к достоинствам атмосферных горелок относятся:

– простота конструкции;

– устойчивая работа горелки при изменении нагрузок;

– надежность работы и простота обслуживания;

– отсутствие вентилятора, электродвигателя для его привода, воздухопроводов к горелкам;

– возможность саморегулирования, т. е. поддержания постоянного соотношения газ — воздух.

К недостаткам инжекционных горелок относятся:

– значительные габариты горелок по длине, особенно горелок увеличенной производительности (например, горелка ИГК-250-00 номинальной производительностью 135 м$^3$/ч имеет длину 1 914 мм);

– высокий уровень шума у инжекционных горелок среднего давления при истечении газовой струи и инжектировании воздуха;

– зависимость поступления вторичного воздуха от разрежения в топке (для инжекционных горелок низкого давления), плохие условия смесеобразования в топке, приводящие к необходимости увеличения общего коэффициента избытка воздуха равного 1,3…1,5 и даже выше для обеспечения полного сгорания топлива.

## 2.4 Методика и расчет конструктивных параметров атмосферных газовых горелок

Теоретический расчет газовых горелок является весьма сложным, так как связан с комплексными расчетами процессов смешения, горения и теплоотдачи, которые должны обеспечивать не только высокую эффективность сжигания газового топлива, но и минимально возможную концентрацию вредных компонентов в продуктах сгорания. Так как такой методики еще не существует, то при расчете горелок приходится пользоваться рядом приближенных данных, полученных из практики или отдельных экспериментов. Ниже приведена наиболее упрощенная и вместе с тем оправдавшая себя в практике методика расчета и пересчета на взаимозаменяемый газ наиболее распространенных газовых горелок [14, 116, 117].

Атмосферные горелки, выдающие гомогенную газовоздушную смесь с $\alpha_1 << 1$. Эти горелки наиболее часто работают на газе низкого давления, широко применяются в бытовых газовых аппаратах и многочисленных тепловых установках предприятий и учреждений городского хозяйства.

Расчет горелок должен обеспечивать необходимую для аппаратов и установок тепловую мощность; широкий диапазон регулирования расхода газа; устойчивость пламени без применения искусственных стабилизаторов горения и отсутствие или малую концентрацию вредных компонентов в продуктах сгорания. Он включает в себя определение размеров, указанных на рисунке 2.5, следующих конструктивных элементов: сопла, горловины смесителя, конфузора, диффузора, огневых каналов и габаритных размеров, обеспечивающих возможность установки горелки в заданной топке [22].

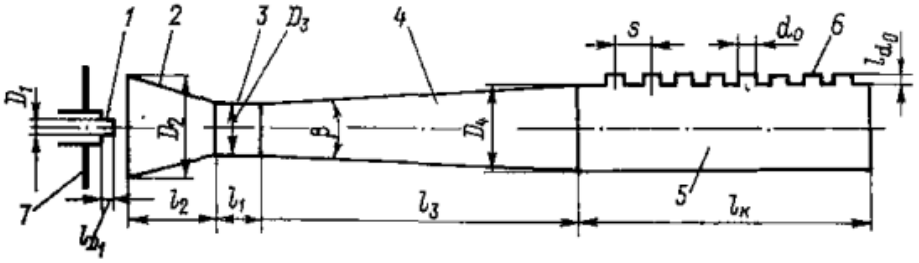


Рисунок 2.5 – Расчетная схема инжекционной горелки:
1 — сопло; 2 — конфузор; 3 — горловина; 4 — диффузор;
5 — распределительный коллектор; 6 — огневые каналы;
7 — регулировочная шайба (поступления первичного воздуха)

Исходными данными для расчета являются тепловая мощность горелки, химический состав газа, давление газа перед соплом и температуры газа и воздуха, а также характеристики аппарата или тепловой установки, для которых горелка рассчитывается. По указанным исходным данным определяют низшую теплоту сгорания и плотность газа, теоретический расход воздуха. При расчете таких

горелок объем газа и его плотность могут определяться при нормальных физических условиях. Объясняется это тем, что давление газа мало отличается от атмосферного, а его температура для зимнего расчетного периода изменяется от 5 до 10 ºС. При тех же условиях с допустимой для практики точностью могут определяться теоретический расход воздуха и его плотность. При расчете горелок можно не учитывать содержание в газе и воздухе водяных паров, так как оно очень мало влияет на объем и плотность, а также теплоту сгорания газа [12].

Выполним расчет параметров инжекционной газовой горелки с коэффициентом избытка воздуха $\alpha_1$ < 1,0 [113-115].

Низшую теплоту сгорания газа ($Q_н$, кДж/м$^3$) находят по теплоте сгорания его компонентов согласно реакции (8):

$$Q_н = 108H_2 + 126{,}3CO + 358{,}2CH_4 + 560{,}5C_2H_4 + 590{,}6C_2H_4 + \\ + 637{,}3C_2H_6 + 912{,}3C_3H_8 + \cdots + 235\,H_2S, \quad (8)$$

где $H_2$, CO, $CH_4$ и т. д. – процентное образование газов в смеси.

Теоретически необходимое количество воздуха для сжигания газа ($V_г$, м$^3$/м$^3$) находят по формуле (9):

$$V_г = 0{,}0476 \cdot \left[0{,}5CO + 0{,}5H_2 + 1{,}5H_2S + \sum\left(m + \frac{n}{4}\right)C_mH_n - O_2\right], \quad (9)$$

где $m$– число атомов углерода в молекуле газа;

$n$ – число атомов водорода в молекуле газа.

$$V_г = 0{,}0476 \cdot [(1 + 0{,}25 \cdot 4) \cdot 93{,}8 + (2 + 0{,}25 \cdot 6) \cdot 2 + (3 + 0{,}25 \times)] \\ [\times 8) \cdot 0{,}8 + (4 + 0{,}25 \cdot 10) \cdot 0{,}3 + (5 + 0{,}25 \cdot 12) \cdot 0{,}1 - 2{,}6 - 0{,}4] = \\ = 9{,}33\ м^3/м^3.$$

Соотношение газовоздушной смеси при среднем расходе газа горелкой рассмотрено на рисунке 2.6.

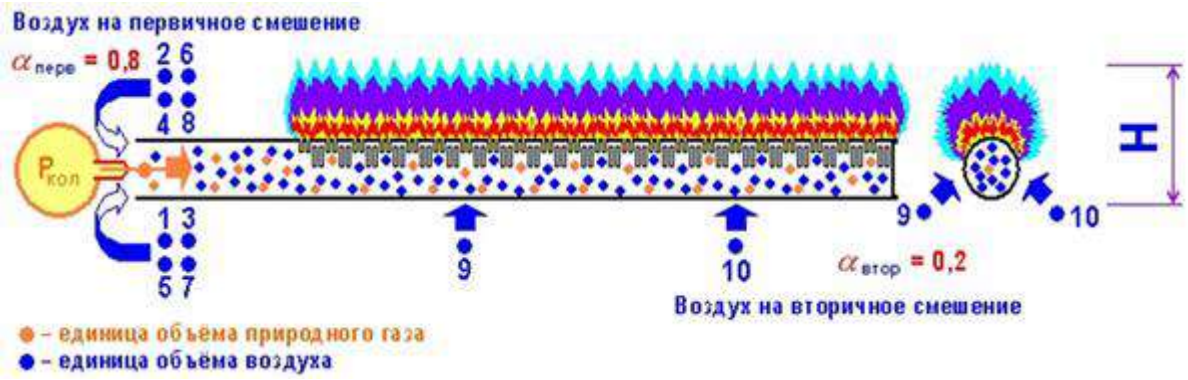


Рисунок 2.6 – Оптимальное соотношение газовоздушной смеси

Расход газа находят по формуле (10):

$$V_г = q/(Q_н \cdot N \cdot \eta), \quad (10)$$

где $V_г$ — расход газа, м$^3$/ч;

$q$ — номинальная теплопроизводительность установки, кДж/ч;

$Q_н$ — низшая теплота сгорания газа, кДж/м$^3$;

$N$ — число принимаемых к установке однотипных горелок с одинаковым расходом газа;

$\eta$ — КПД установки.

$$V_г = 68\,250\,000/(36\,117{,}8 \cdot 1 \cdot 91{,}7) = 20{,}6 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Давление газа перед соплом горелки определяется на основании гидравлического расчета газопроводов [12, 13]. Вместе с тем для обеспечения широкого диапазона регулирования расхода газа оно должно быть не менее определяемого по формуле (11):

$$\text{Р}_г = 0{,}27 \cdot Q_н \cdot N/100 + 40. \quad (11)$$

где $\text{Р}_г$ — давление газа перед соплом, Па;

$$\text{Р}_г = 0{,}27 \cdot 36\,117{,}8 /100 + 40 = 137{,}52 \text{ Па}.$$

Теоретическая скорость истечения газа из сопла ($\omega_г$,) при низком давлении (до 5 кПа) рассчитывается по формуле (12) гидравлики, не учитывающей изменение плотности газа:

$$\omega_г = \sqrt{2 \cdot \text{Р}_г/\rho_г}, \quad (12)$$

где $\omega_г$ – теоретическая скорость истечения газа из сопла, м/с;

$\rho_г$ — плотность газа, кг/м$^3$.

$$\omega_г = \sqrt{2 \cdot 137{,}52/0{,}71} = 19{,}7 \text{ м/с}.$$

Площадь поперечного сечения газового сопла ($f_{D1}$, м$^2$) определяется по формуле (13):

$$f_{D1} = V_г/(3\,600 \cdot \mu \cdot \omega_г), \quad (13)$$

где $\mu$ — коэффициент расхода, учитывающий неравномерность распределения скоростей потока газа по сечению сопла.

Диаметр газового сопла ($D_1$, м) определяется по формуле (14):

$$D_1 = \sqrt{4 \cdot f_{D1} / 3{,}14}. \quad (14)$$

$$f_{D1} = 20{,}6/(3\,600 \cdot 0{,}7 \cdot 19{,}7) = 0{,}000415 \text{ м}^3.$$

$$D_1 = \sqrt{4 \cdot 0{,}000415 / 3{,}14} = 0{,}023 \text{ м}.$$

Сопротивление трения и сжатие струи, зависит от формы сопла ($\mu$ = 0,8 для $\alpha$ = 90º, указанного на рисунке 2.7).

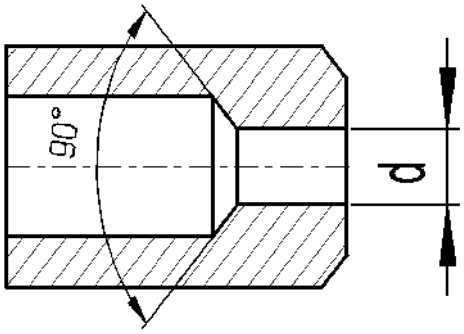


Рисунок 2.7 – Соотношение в цилиндрическом сопле

Для цилиндрического сопла с острыми краями в тонкой стенке, показанного на рисунке 2.8 (а), в зависимости от качества обработки внутренней стенки $\mu$ = 0,6-0,65; для того же сопла, но с закругленными изнутри краями (рисунок 2.8 (б)) $\mu$ = 0,7-0,75; для конического сопла (рисунок 2.8 (в)) коэффициент расхода μ зависит от угла конусности $\beta$: при $\beta$ = 15°; $\mu$ = 0,9; при $\beta$ = 30°; $\mu$ = 0,85 и при $\beta$ = 45°; $\mu$ = 0,82; для наиболее распространенного сопла (рисунок 2.8 (г)) с цилиндрическим каналом и $\beta$ = 90° значение $\mu$ зависит от отношения длины цилиндрической части сопла $l_{D_1}$ к диаметру сопла $D_1$ при $l_{D_1}/D_1 = 0{,}18$, $\mu$ = 0,75; при $l_{D_1}/D_1 = 0{,}45$, $\mu$ = 0,85; при $l_{D_1}/D_1 = 1{,}0$, $\mu$ = 0,85; при $l_{D_1}/D_1 = 2{,}0$, $\mu$ = 0,84 [17, 111, 112].

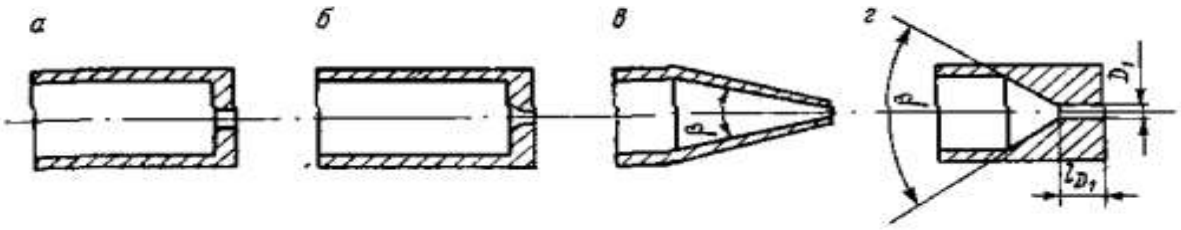


Рисунок 2.8 – Формы сопел инжекционных горелок

Диаметр горла смесителя, выражающего закон сохранения количества движения при смешении двух газов. Количество движения 1 м$^3$ инжектируемого газа равно ( $\omega_г \cdot \rho_г$) , а инжектируемого из атмосферы воздуха может приниматься равным нулю. В этом случае количество движения смеси газа и воздуха определяется по формуле (15):

$$\omega_г \cdot \rho_г = \omega_3 \cdot (\rho_в + n \cdot \rho_в), \quad (15)$$

где $\omega_3$ — скорость газовоздушной смеси в горловине смесителя, м/с;

$\rho_в$ — плотность воздуха, кг/м$^3$;

$n$ — объемная кратность инжекции (количество воздуха, инжектируемое 1 м$^3$ газа), м$^3$/м$^3$.

Уравнение (16) сохранения количества движения будет иметь тот же вид:

$$\omega_г \cdot \rho_г = \omega_3 \cdot (\rho_в + n \cdot \rho_в), \quad (16)$$

Выразив расход газа ($V_г$, м$^3$/ч), и смеси ($V_г \cdot (1 + n)$, м$^3$/ч), через соответствующие скорости и сечения, получаем формулу (17):

$$V_г/3\,600 = \pi \cdot D_1 \cdot 2 \cdot \omega_г/4;$$

$$V_г \cdot (1 + n)/3\,600 = \pi \cdot D_3 \cdot 2 \cdot \omega_г/4;$$

$$\text{получим } \omega_3 = \omega_г \cdot (1 + n) \cdot (D_1/D_3) \cdot 2;$$

Так как кратность инжекции $n = V_г \cdot Т \cdot \alpha_1$, то

$$D_3 = D_1 \cdot \sqrt{(1 + \alpha_1 \cdot V_г)} \cdot (1 + \alpha_1 \cdot V_г \cdot \rho_в / \rho_г), \quad (17)$$

где $D_3$ — Диаметр горла смесителя, м;

$\alpha_1$ — коэффициент избытка инжектируемого воздуха;

($V_г \cdot Т$) — теоретическая потребность в воздухе для сгорания 1 м$^3$ газа, м$^3$/м$^3$.

$$D_3 = 0{,}023 \cdot \sqrt{(1 + 0{,}38 \cdot 9{,}33)} \cdot (1 + 0{,}38 \cdot 9{,}33 \cdot 1{,}29/0{,}71) = 0{,}2 \text{ м.}$$

Формула (17) показывает, что $\alpha_1$ для данного вида газа зависит только от соотношения диаметра горловины к диаметру сопла и не зависит от давления инжектирующего газа. Это значит, что инжекционные горелки обеспечивают постоянство соотношения газа и воздуха в смеси независимо от изменения расхода газа [23, 29, 110].

Так, для горелок рассматриваемого вида $\alpha_1$ должен приниматься таким, чтобы

не происходило проскока пламени внутрь смесителя при минимально необходимом расходе газа согласно рисунку 2.9.

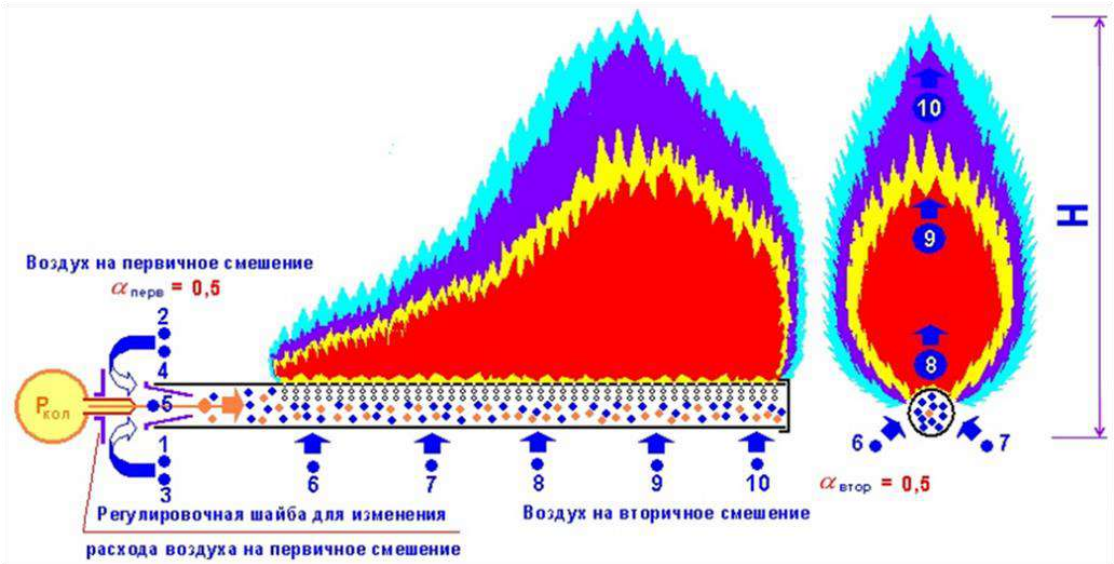


Рисунок 2.9 – Работа горелки при максимальной величине расхода газа

Численное значение этого коэффициента выражается по формуле (18):

$$\alpha_1 < [(100/L_B) - 1] \cdot (1/V_г), \quad (18)$$

где $L_B$ — верхний предел воспламеняемости газа, % об.

$$\alpha_1 < 0{,}6.$$

Одновременно значение $\alpha_1$ должно быть больше такого, при котором возможно образование желтых языков (краев) пламени, согласно формуле (19):

$$\alpha_1 > 0{,}75 \cdot (m + n/4) \cdot 0.5 \cdot d_0 \cdot 0{,}25, \quad (19)$$

где $m$ — число углеродных атомов в молекуле или среднее их число в сложном газе;

$n$ — то же, водородных атомов;

$d_0$ — диаметр огневых каналов на коллекторе горелки, м.

$$\alpha_1 > 0{,}15.$$

Диаметры конфузора $D_2$ и диффузора $D_4$ принимаются примерно одинаковыми согласно формуле (20):

$$D_2 \sim D_4 = (2{,}0 - 2{,}2) \cdot D_3. \quad (20)$$

$$D_2 \sim D_4 = 2{,}1 \cdot 0{,}2 = 0{,}42 \text{ м.}$$

Длина горловины смесителя $l_{D_1}$ и длина конфузора $l_{D_2}$ вычисляются по формулам (21) и (22):

$$l_{D_1} = (2{,}5 - 3{,}5) \cdot D_3. \quad (21)$$

$$l_{D_1} = 3 \cdot D_3 = 0{,}6.$$

$$l_{D_2} = (1{,}3 - 1{,}5) \cdot D_3. \quad (22)$$

$$l_{D_2} = 1{,}4 \cdot D_3 = 0{,}28.$$

Переход конической поверхности конфузора в цилиндрическую горловины для литых смесителей рекомендуется выполнять по дуге окружности радиуса согласно формуле (23):

$$R = (3 - 5) \cdot D_3. \quad (23)$$

$$R = 4 \cdot D_3 = 0{,}8 \text{ м.}$$

Значения коэффициента $R$ в зависимости от вида газа и коэффициента избытка первичного воздуха $\alpha_1$ приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Значения коэффициента $R$ в зависимости от вида газа

| Коэффициент избытка первичного воздуха, $\alpha_1$ | Природный газ | Сжиженный углеводородный газ | Коксовый газ |
|---|---|---|---|
| 0,2 | - | - | 0,85 |
| 0,3 | 0,85 | - | 0,60 |
| 0,4 | 0,70 | 1,10 | 0,50 |
| 0,5 | 0,60 | 0,90 | 0,38 |
| 0,6 | 0,50 | 0,80 | 0,30 |
| 0,7 | 0,40 | 0,65 | 0,24 |
| 0,8 | 0,32 | 0,50 | 0,20 |

Длина диффузора смесителя ($l_{D_3}$ , м) вычисляется по формуле (24):

$$l_{D_3} = (D_4 - D_3)/(2 \cdot \mathrm{tg}\, \theta/2), \quad (24)$$

где $\theta$ — угол расширения диффузора, принимаемый для обеспечения безотрывности потока газовоздушной смеси в пределах 6—8° [31].

$$l_{D_3} = (D_4 - D_3)/0{,}1 = 2{,}2 \text{ м.}$$

Суммарная площадь огневых каналов коллектора ($\sum f_{d_0}$, м$^2$) вычисляется по формуле (25):

$$\sum f_{d_0} = V_{см} / \omega_{см} = V_г \cdot (1 + \alpha_1 \cdot V_г)/(3\,600 \cdot \omega_{см}), \qquad (25)$$

где $V_{см}$ — расход газовоздушной смеси, м$^3$/с;

$\omega_{см}$ — скорость вытекания из огневых каналов газовоздушной смеси, м/с.

$$\sum f_{d_0} = 20{,}6 \cdot (1 + 0{,}38 \cdot 9{,}33)/(3\,600 \cdot 50) = 0{,}0005202 \text{ м}^2.$$

Скорость $\omega_{см}$ принимается такой, чтобы не происходило отрыва пламени. Эта скорость для природных газов должна быть несколько меньше определяемой по формуле (26):

$$\omega_{см} < 3{,}6 \cdot 10 - 3 \cdot d_0 \cdot T \cdot (1 + V_г)/(1 + \alpha_1 \cdot V_г), \qquad (26)$$

где $T$ — абсолютная температура газовоздушной смеси, К.

$$\omega_г \leq 3{,}6 \cdot 10 - 3 \cdot 0{,}079 \cdot 2\,932 \times$$
$$\times (1 + 9{,}33)/(1 + 0{,}38 \cdot 9{,}33) = 55{,}6 \sim 50 \text{ м/с.}$$

Так как уравнение (26) имеет две неизвестные величины, то для определения скорости вытекания смеси необходимо задаваться диаметрами огневых каналов. Обычно их размеры укладываются в пределы от 3 до 6 мм [30].

Число огневых каналов на коллекторе вычисляется по формуле (27):

$$N = \sum f_{d_0} / f_{d_0}, \qquad (27)$$

где $f_{d_0}$— площадь одного огневого канала, м$^3$.

$N$ – число огневых каналов на коллекторе.

$$N = 0{,}0005202/79 \sim 7.$$

Огневые каналы на коллекторе горелки обычно размещаются в один или в два ряда, в последнем случае - в шахматном порядке. При двухрядном расположении каналов минимальная длина коллектора ($l_к$, м) вычисляется по формуле (28):

$$l_к = (N - 1) \cdot s/2 + 2 \cdot S, \qquad (28)$$

где s — шаг между осями огневых каналов, м.

Для обеспечения быстрого распространения пламени по всем каналам и предотвращения их слияния принятый шаг между осями каналов должен укладываться в пределы, определенные экспериментально, согласно рисунка 2.10. При $\alpha_1 = 0{,}6$ для $d_0 = 2 - 6$ мм, $s = (2{,}4 - 2{,}8) \cdot d_0$. Для этой же цели расстояние между осями рядов каналов должно быть в (2,0—2,5) раза больше расстояния между каналами [18].

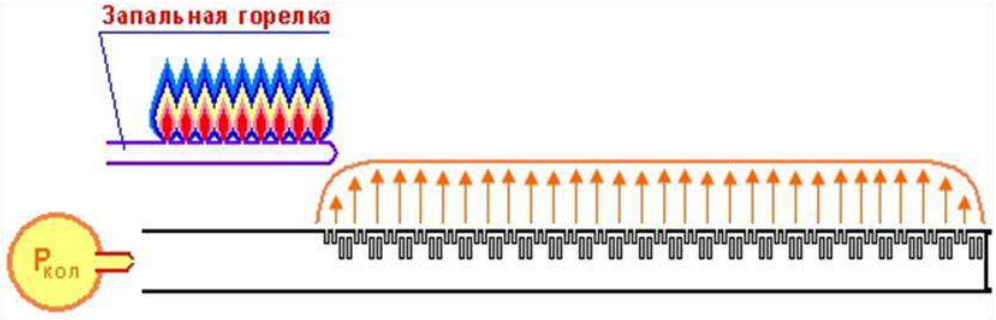


Рисунок 2.10 – Схематичное расположение огневых каналов для обеспечения распространения пламени

По экспериментальным данным глубину каналов следует вычислять по формуле (29):

$$l_{d_0} = (1{,}5 - 2{,}0) \cdot d_0. \quad (29)$$

$$l_{d_0} = 1{,}75 \cdot d_0 = 138{,}25 \text{ мм}.$$

Большая глубина должна приниматься для быстрогорящих газов и в тех случаях, когда $\alpha_1$ близок к пределу воспламеняемости или больше него.

Газовые горелки должны размещаться в топке так, чтобы конусный фронт пламени не омывал теплообменных поверхностей, так как это приводит к появлению продуктов незавершенного сгорания [19].

Далее на примере будет рассмотрен практический подход к расчёту газовых горелок для построения последующих этапов работы.

Расчёт горелки сводится к определению геометрических характеристик, обеспечивающих необходимую глубину проникновения струй газа в поперечный поток воздуха: площадь и соответствующие геометрические размеры горелки, диаметры больших и малых газовых сопел и их количество, шаг установки сопел, а также длины факела.

В различных типах газовых горелок рекомендуемые скорости газа и воздуха изменяются в широком диапазоне:

$$W_г = 40 - 120 \text{ м/с};$$
$$W_в = 25 - 80 \text{ м/с}.$$

Исходные данные для расчёта:
$\alpha_г$ – коэффициент избытка воздуха в горелке;
$W_в$ – скорость воздуха, м/с;
$W_г$ – скорость газа на выходе из сопел, м/с
$t_в$ – температура воздуха, ˚С;
$0$ - объёмный расход газа, м$^3$/с;
$t_г$ – температура газа, ˚С;
Состав газа: $CH_4$, $C_2H_6$, $C_3H_8$, $C_4H_{10}$, $C_5H_{12}$, CO, $H_2$, $H_2S$, $CO_2$, $O_2$, $N_2$.

Рассчитать многофакельную инжекционную горелку низкого давления с коэффициентом инжекции равному $\alpha$ = 0,5 для котла с длинной топки 1200 мм, шириной 400 мм, высотой 400 мм. Расход газа на котел составит 5 м$^3$. Давление газа 15 миллибар.

В качестве топлива используется природный газ $\rho$ = 0,75 кг/м$^3$ и $Q_h$ = 36000 кДж/м$^3$. Теоретическое количество воздуха необходимого на сжигания 1 м$^3$ составит $V$ = 10 м$^3$. Коэффициент избытка воздуха принят согласно достижения эффективной топочной температуры и равен $\alpha$ = 1,1 [20, 32, 109].

Для того чтобы осуществить эффективный нагрев котлового теплообменника установим на топку котла три горелочные трубы. Рассчитать многофакельную инжекционную горелку низкого давления для котла с длинной топки 1200 мм, шириной 400 мм, высотой 400 мм. Расход газа на котел составит 5 м$^3$. Давление газа 15 миллибар. В качестве топлива используется природный газ $\rho$ = 0,75 кг/м$^3$ и $Q_h$ = 36000 кДж/м$^3$. Теоретическое количество воздуха необходимого на сжигания 1 м$^3$ составит $V$ = 10 м$^3$. Коэффициент избытка воздуха принят согласно достижения эффективной топочной температуры и равен $\alpha$ = 1,1.

Для того чтобы осуществить эффективный нагрев котлового теплообменника установим на топку котла три горелочные трубы, тогда расход газа на одну горелочную трубу вычисляется по формуле (30):

$$V_г = V_к/3 = 5/3 = 1{,}66. \quad (30)$$

Вследствие небольших габаритов для сокращения длины факелов и получения несветящегося пламени принимаем много факельную горелку с коэффициентом инжекции равному $\alpha$ = 0,5. Определяем площадь поперечного сечения сопла инжектора по выражению (31):

$$f_c = V_г/3\,600 \cdot \varphi \cdot \sqrt{2P/\rho}. \quad (31)$$

$$f_c = 1{,}66/3\,600 \cdot 0{,}9 \cdot \sqrt{2 \cdot 1\,500/0{,}75} = 0{,}0000081 \text{ м}^2.$$

Коэффициент истечения $\varphi = 0{,}9$, как для конического сопла при $\beta = 50 - 60°$.

Диаметр сопла определяем по его площади с помощью формулы (32):

$$d_c = \sqrt{f_c/0{,}785 \cdot n_c}, \quad (32)$$

где $n_c$ = 1, так как взята односопловая горелка.

$$d_c = \sqrt{0{,}0000081/0{,}785 \cdot 1} = 0{,}0032 = 3{,}2 \text{ мм}.$$

Находим расстояние ($X$, мм) от устья сопла до горловины по формуле (33):

$$\mathrm{X} = d_c \cdot \left[0{,}23 \cdot (1 + \alpha \cdot V_0) \cdot \sqrt{\rho_в/\rho_г} - 0{,}145\right]/\alpha, \quad (33)$$

где $\alpha$ = 0,071 – коэффициент турбулизации струй для сопла с поджатием.

$$\mathrm{X} = 3{,}2 \cdot \left[0{,}23 \cdot (1 + 0{,}5 \cdot 10) \cdot \sqrt{1{,}185/0{,}785} - 0{,}145\right]/0{,}071 = 71{,}64 \text{ мм}.$$

Рассчитаем внутренний диаметр горловины ($d_г$, мм) по формуле (34):

$$d_г = 6{,}8 \cdot (\alpha \cdot \mathrm{X} + 0{,}145 \cdot d_c) = 37{,}7 \approx 40 \text{ мм}. \quad (34)$$

Определяем длину горловины ($L_г$, мм) по зависимости, согласно которой длина горловины горелки вычисляется по формуле (35):

$$L_г = (1 \ldots 2) \cdot d_г = 1{,}5 \cdot 40 = 60 \text{ мм}. \quad (35)$$

Далее определяем диаметр выходного сечения диффузора ($d_{диф}$, мм) согласно соотношению (36):

$$d_{диф} = d_г/0{,}55 = 68{,}545 \text{ мм}. \quad (36)$$

Длину диффузора при углераскрытии $\beta$ = 8°, которая справедлива для частей горелки имеющих форму усеченного конуса, определяем по формуле (37):

$$L_{диффузора} = (d_б - d_м)/2 \cdot \mathrm{tg}\,(\beta/2) = 220{,}55 \approx 6 \cdot d_г = 250 \text{ мм}. \quad (37)$$

Согласно условию, которое указывает на то, что длина диффузора для полного завершения сжигания газа с воздухом должна быть не менее ($6 \cdot d_г$).

Далее рассчитаем площадь входного сечения конфузора при скорости входа первичного воздуха $W_в$ = 1,6 м/с, согласно формуле (38):

$$f_к = \alpha \cdot V_o \cdot V_г/3600 \cdot W_в = 0{,}00144 \text{ м}^2. \quad (38)$$

Диаметр входного сечения конфузора ($d_к$, мм) вычисляется по формуле (39):

$$d_к = \sqrt{f_к/0{,}785} = 43 \text{ мм}. \quad (39)$$

Длину конфузора при углераскрытии $\beta$ = 25˚ определяем по формуле (40):

$$L_{конфузора} = (d_б - d_м)/2 \cdot \text{tg}\,(\beta/2) = 11{,}9 \text{ мм}. \quad (40)$$

Далее диаметр многофакельной насадки принимаем по выходному диаметру диффузора $d_н$ = 68,545 мм и находим диаметр огневых горелочных отверстий. Так как производительность горелки для такого класса относительная большая, длинна топки ограниченна, а высота топки равна 400 мм принимаем диаметр огневых отверстий равным 3 мм [33, 108].

Максимально допустимая скорость входа газовоздушной смеси из горелочных отверстий при α = 0,5 и $d_{огн}$ = 3 мм составит $W_{max}$ = 2,5 м/с.

По полученной скорости определяем необходимую площадь горелочных отверстий с учетом температуры смеси для горения равной $T$ = 25 °С по формуле (41):

$$\sum f_{огн} = [V_г \cdot (1 + \alpha \cdot V_0)/3\,600 \cdot 2{,}5] \cdot [(273 + 25)/273] = 0{,}012 \text{ м}^2. \quad (41)$$

Количество огневых отверстий находим по формуле (42):

$$n = \sum f_{огн}/0{,}785 \cdot d_{огн}^2 = 169{,}85 \approx 170. \quad (42)$$

Далее определяем длину насадки при двух рядах отверстий, учитывая шаг между осями отверстий $S$ = 8 мм.

Длину насадки при двух рядах отверстий определяем по формуле (43):

$$L_н = (n \cdot S/2) + (2 \cdot S \cdot 2) = 712 \text{ мм}. \quad (43)$$

Этот размер 712 мм не превышает длину топки.

Далее проверяем баланс энергии в горелки для этого определим скорость газа на выходе из сопла по формуле (44):

$$W_с = V_г/3\,600 \cdot f_c = 56{,}92 \text{ м/с}. \quad (44)$$

Далее найдем кинетическую энергию газа на выходе из сопла [21]. Источником энергии является кинетическая энергия струи газа, вытекающей из сопла согласно формуле (45):

$$Е_к = W_c^2/2/2 = 1\,619{,}94 \text{ кДж/м}^3. \quad (45)$$

Для определения затрат энергии на создание скорости инжектированного воздуха при $T$ = 25 °С найдем площадь поперечного сечения горловины согласно формуле (46):

$$f_г = 0{,}785 \cdot d_г^2 = 0{,}001256 \text{ м}^2. \quad (46)$$

Далее найдем скорость газовоздушной смеси в горловине по формуле (47):

$$W_г = [V_г \cdot (1 + \alpha \cdot V_0)]/3\,600 \cdot f_c = 2{,}40 \text{ м/с}. \quad (47)$$

Отсюда затраты энергии на создание скорости инжектируемого воздуха составит по формуле (48):

$$E_в = (W_г^2 \cdot \alpha \cdot \rho_в)/2 = 17{,}064 \text{ кДж/м}^3. \quad (48)$$

Затраты энергии на изменение скорости струи газа находятся по формуле (49):

$$E_г = [(W_c - W_г)^2 \cdot \rho_0]/2 = 1\,114{,}66 \text{ кДж/м}^3. \quad (49)$$

Чтобы определить затраты энергии в диффузоре, найдем площадь поперечного сечения выходного отверстия диффузора по формуле (50):

$$f_д = 0{,}785 \cdot d_д^2 = 0{,}0036 \text{ м}^2. \quad (50)$$

Далее определим скорость в диффузоре газовоздушной смеси по формуле (51):

$$W_д = \left[V_г \cdot (1 + \alpha \cdot V_0)/3\,600 \cdot f_д\right] \cdot [(273 + t_{см})/273] = 0{,}8388 \text{ м/с}. \quad (51)$$

Далее находим затраты энергии на изменение скорости газовоздушной смеси от $W_г$ до $W_д$ по формуле (52):

$$E_д = \left[\left(W_г^2 - W_д^2\right)(\rho_0 + \alpha \cdot V_0 \cdot \rho_0) \cdot (1 - \eta)\right]/2 = 3{,}377 \text{ кДж/м}^3. \quad (52)$$

Определяем энергию потока газовоздушной смеси в насадке, которая остаётся для создания скорости выхода смеси из горелочных отверстий по формуле (53):

$$E_n = E - E_в - E_г - E_д = 484{,}43 \text{ кДж/м}^3. \quad (53)$$

Энергия потока газовоздушной смеси на входе в насадки горелки посчитаем по формуле (54):

$$E_{смеси} = E_n/(1 + \alpha \cdot V_0) = 80{,}80 \text{ кДж/м}^3. \quad (54)$$

Для определения скорости выхода газовоздушной смеси из горелочных отверстий предварительно найдем плотность газовоздушной смеси по формуле (55):

$$\rho_{см} = (\rho_0 + \alpha \cdot V_0 \cdot \rho_в)/1 + \alpha \cdot V_0 = 1{,}11 \text{ кг/м}^3. \quad (55)$$

Тогда скорость выхода смеси из горелочных устройств найдем согласно формуле (56):

$$W_{см} = \left(\varphi \cdot \sqrt{2/\rho_{см}}\right) \cdot \sqrt{0{,}7 \cdot \text{Е}_{см}} = 9{,}08 \text{ м/с}. \quad (56)$$

Для определения длины факелов горелки найдем тепловое напряжение горелочных отверстий по формуле (57):

$$q_{огн} = V_г \cdot Q_н/0{,}785 \cdot d_{огн}^2 \cdot n = 497\,564 \text{ Вт/м}^2. \quad (57)$$

Тогда длина внутреннего и наружного конусов факела, принимая коэффициенты $C_1$ и $C_2$, определятся по формулам (58) и (59):

$$L_{lh} = C_1 \cdot d_{огн}^2 \cdot q_{огн} \cdot 10^{-7} = 0{,}51 \text{ мм}. \quad (58)$$

$$L_ф = C_2 \cdot q_{огн} \cdot \sqrt{d_{огн}^3} \cdot 10^{-7} = 2{,}2493 \text{ мм}. \quad (59)$$

# 3 КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ПРОГРАММЕ ANSYS

Быстрое развитие вычислительной техники и ее внедрение практически во все сферы жизни привело к тому, что сегодня грамотный специалист в любой области знаний должен хорошо ориентироваться в мире компьютеров и владеть необходимыми программными средствами [21]. Современный инженер не возможен без знания систем автоматического проектирования (CAD – Computer Aids Design), автоматического производства (CAM – Computer Aids Manufacturing) и автоматического инженерного анализа (CAE – Computer Aids Engineering). Такие CAD/CAM системы как AutoCAD, DUCT, Pro/Engineer, Unigraphics и SOLIDWORKS широко используются для компьютерного моделирования изделий сложной формы, с последующим выпуском чертежей и генерацией управляющих программ для станков с ЧПУ. Однако эти специализированные пакеты численного моделирования не обладают развитыми средствами инженерного анализа. CAE-системы инженерного анализа (ABAQUS, ANSYS, COSMOS, I-DEAS, NASTRAN, и другие) позволяют не только выполнить качественное моделирование систем различной физической природы, но и исследовать отклик этих систем на внешние воздействия в виде распределения напряжений, температур, скоростей, электромагнитных полей и т. д. Использование таких программ помогает проектным организациям сократить цикл разработки, снизить стоимость изделий и повысить качества продукции. В связи с этим одной из новых задач высшей школы является подготовка специалистов, владеющих современными программными комплексами инженерного анализа [21, 34].

Один из самых распространенных комплексов инженерного анализа – программа ANSYS, которая использует метод конечных элементов. Данный программный комплекс обладает независимостью от аппаратных средств, многоцелевой направленностью, полной совместимостью с CAD/CAM/CAE системами ведущих производителей, геометрическое моделирование основано на базе технологии NURB (B-сплайны). Бесплатная лицензия для студентов дает много возможностей для выполнения научно-исследовательских работ.

## 3.1 Обзор существующего программного обеспечения для моделирования процессов горения

В современной инженерии необходимы знания систем автоматического проектирования (CAD), автоматического инженерного анализа (CAE), автоматического производства (CAM). Для компьютерного моделирования объектов сложной формы широко используются такие системы CAD/CAM как AutoCAD, DUCT, Pro/Engineer, Unigraphics и SOLIDWORKS. Однако эти пакеты специализированы только под численное моделирование и не обладают достаточно развитыми средствами в области инженерного анализа. В то время как CAE-системы (I-DEAS, COSMOS, NASTRAN, ANSYS) сочетают в себе качественное моделирование систем физической природы и эффективное исследование откликов

этих систем на внешние воздействия. Использование подобных программ позволяет сократить цикл разработки, повысить качество продукции.

История появления программы SOLIDWORKS.

Корпорация SOLIDWORKS Corp. появилась в 1993 году, а первую созданную версию ПО SOLIDWORKS она представила в 1995 году. С этого времени программа оказалась под пристальным вниманием многих известных аналитиков, специализирующихся в сфере САПР [15].

Для реализации функционала была выбрана и использована Microsoft Windows, тогда как ранее такие осуществляемые разработки подлежали реализации исключительно на операционной системе Unix, на которой работали в течение нескольких десятилетий. В настоящее время Unix-образные САПР давно ушли в прошлое и передали приложения системе Windows.

В далеком 1997 году корпорация SOLIDWORKS Corp. вступила в состав крупнейшего IT холдинга Dassault Systemes, причём такое стратегическое решение признано компетентными источниками самым удачным. Поэтому сегодня программа SOLIDWORKS считается популярным и широко применяемым пакетом 3D моделирования.

Возможности программы SOLIDWORKS.

Базовые функции этой программы доступны пользователям без применения специальных расширений, но созданные дополнительные модули увеличивают её функции.

Некоторые возможности этой программы:

– 3D моделирование разных твердых тел;

– разработка необходимых сварных конструкций;

– проведение расчётов на прочность и точный просчет гидро- и аэродинамики;

– создание разнообразных чертежей;

– выполнение проектирования с принятием во внимание материала, используемого для создания изделия;

– визуализация и проведение просчета на возможный изгиб;

– использование данных после выполненного 3D сканирования;

– проектирование разнообразной продукции, для изготовления которой используется листовой металл;

– чтение электросхем;

– экспорт полученных данных и их перевод в разные форматы.

Основой проектирования каждого сложного промышленного изделия является выполняемое 3D моделирование, которым занимаются опытные квалифицированные специалисты [27].

В SOLIDWORKS доступны следующие функции:

а) твердотельное моделирование с разработкой изделий, которые имеют свойства вполне реальных физических объектов. Это практически идеальный вариант, позволяющий визуально представить изделие.

б) Поверхностное моделирование, которое реализуется в этой программе через проведение действий с кривыми или сплайнами.

в) Каркасное моделирование, позволяющее представить форму объекта.

Процесс 3D моделирования выполняется с помощью эскизов. На имеющейся основной базовой плоскости создаётся самая простая форма с помощью разных операций, которыми становятся вращение, выполняемое выдавливание, проведение выреза по сечению или траектории. Также объект можно скруглить, зеркально отразить, создать необходимые тонкостенные элементы, соответствующую резьбу и выполнить остальные операции.

SOLIDWORKS Simulation — это полнофункциональное решение для инженерных расчетов и анализа, полностью интегрированное в рабочую среду SolidWorks. Оно помогает быстрее выводить изделия на рынок, экономить средства и поддерживать высокое качество продукции. С SOLIDWORKS Simulation могут работать не только специалисты по расчетам, но и конструктора.

С помощью SOLIDWORKS Simulation можно прогнозировать поведение изделия в реальной эксплуатации. Для этого цифровая САПР-модель анализируется методом конечных элементов (МКЭ). Можно проводить линейный статический, нелинейный статический и динамический анализ. Один из примеров теплового расчета представлен на рисунке 3.1. Решение поставляется в трех конфигурациях: Simulation Standard, Simulation Professional и Simulation Premium. Каждая конфигурация более высокого уровня содержит все функции предыдущей, плюс дополнительные расширенные возможности.

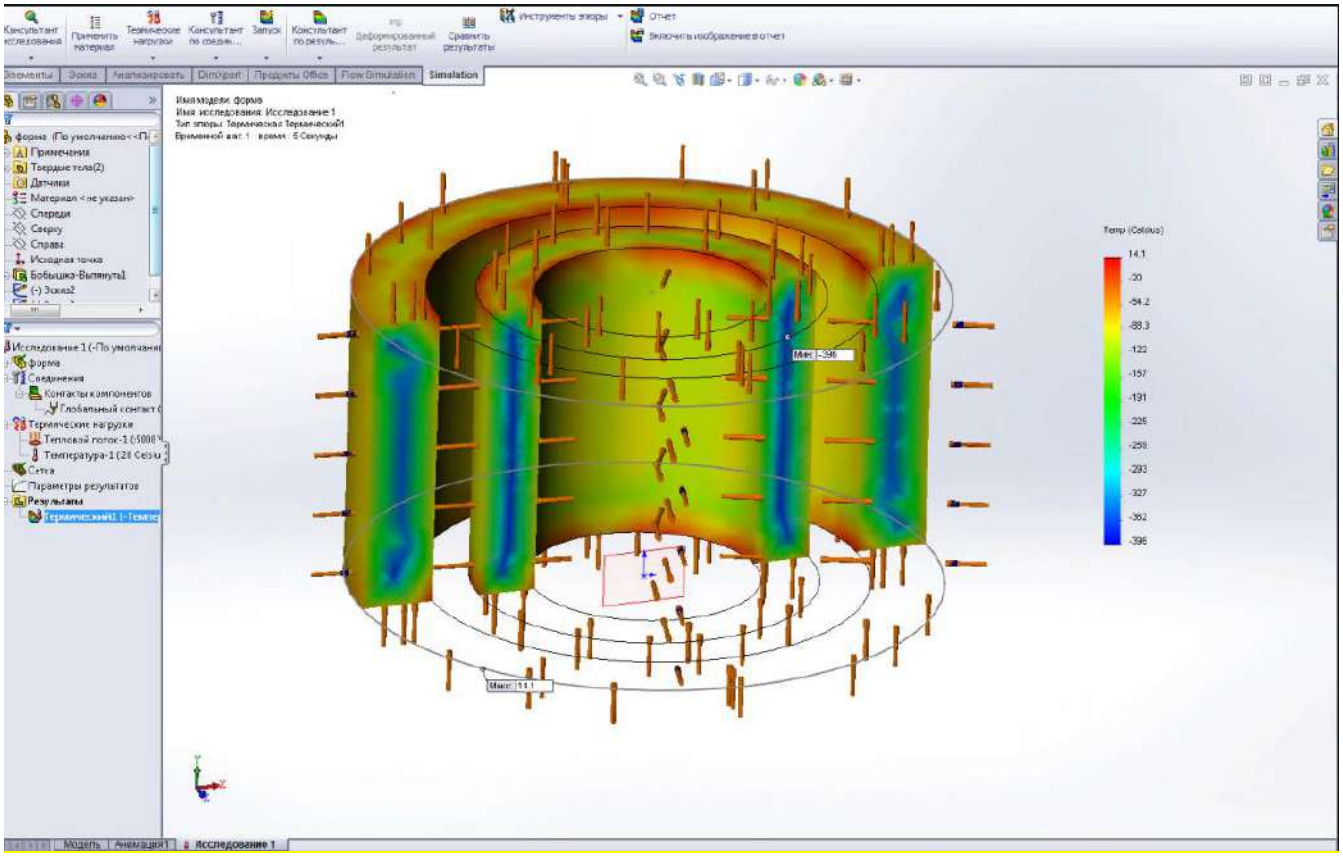


Рисунок 3.1 – Термическое исследование в SOLIDWORKS Simulation

Преимущества SOLIDWORKS Simulation:

– Возможность быстро просчитать большое количество альтернативных вариантов конструкции.

– Сокращение цикла разработки благодаря оптимизации конструкторских решений.

– Определение запаса прочности, усталостных напряжений и других параметров на ранних стадиях разработки изделия.

– Сокращение расходов на материалы. SOLIDWORKS Simulation помогает выявить и исключить излишний запас прочности.

– Снижение затрат на испытания физических образцов благодаря виртуальным испытаниям цифровых 3D-моделей.

SOLIDWORKS Simulation Standard предоставляет конструкторам удобную среду для виртуальных испытаний, в которой проводятся линейный статический, динамический и усталостный анализ. В статических задачах (функция Static Study) подразумевается, что материалы обладают упругими и линейными свойствами, а все нагрузки и закрепления — статические, то есть не изменяются со временем. На основании исходных условий рассчитываются напряжения в конструкции, деформации, сдвиги и прочностные характеристики [106, 107].

Усталостный анализ посвящен определению многоцикловой усталостной прочности компонентов, подвергающихся различным переменным нагрузкам, пиковые значения которых ниже предела текучести материала. Места и временные отметки разрушения определяются методом накопления повреждений. Функции Trend Tracker и Design Insight Plot подсказывают, какие изменения в конструкции будут наиболее оптимальными. Динамический анализ выполняется с помощью инструмента, исследующего кинематику и динамику жестких тел. В нем определяются скорости, ускорения и перемещения изделия под рабочими нагрузками. Кроме того, у инженеров есть возможность рассчитывать энергетические потребности изделий с учетом пружинных и демпферных эффектов. Simulation Standard помогает конструкторам узнать, будет ли их продукт работать правильно и как долго он будет это делать. По завершении динамического анализа нагрузки, действующие на компоненты извне и в соединениях, могут быть сохранены и использованы в функциях анализа.

В SOLIDWORKS Simulation Standard реализована возможность параллельной разработки изделия инженерами нескольких смежных дисциплин.

SOLIDWORKS Simulation Professional содержит мощные, удобные в использовании средства комплексного физического анализа. Чтобы в расчетах напряжений учитывался эффект теплового расширения материала, в исходные данные для линейного статического анализа добавляется распределение температур, полученное при статических или переходных тепловых расчетах. Если изделие в процессе эксплуатации подвергается вибрации, настоятельно рекомендуется выполнить частотный анализ, который выявит собственные частоты и поможет принять меры для того, чтобы изделие не входило в резонанс, резко снижающий его долговечность.

Анализ альтернативных вариантов реализован в SOLIDWORKS Simulation Professional как задача параметрической оптимизации. Пользователи варьируют параметры модели, материалы, нагрузки и удерживающие усилия, чтобы выявить, какая конструкция окажется наиболее оптимальной и надежной. Чрезмерно тонкие конструктивные элементы, к которым приложена нагрузка в своей плоскости, могут потерять устойчивость, даже если величина нагрузки намного меньше предела текучести; такое их состояние выявляется при решении задачи прогиба. Для обеспечения прочности сосудов высокого давления существует функция, которая формирует сводку приведенных к линейному виду напряжений, обусловленных давлениями и нагрузками в трубопроводной системе [25]. Решая топологическую задачу, инженеры подбирают конструкцию, обладающую наименьшей массой, но одновременно и достаточной прочностью под линейной упругой статической нагрузкой.

SOLIDWORKS Simulation Professional помогает инженерам разрабатывать современные инновационные изделия, обладающие необходимой прочностью, надежностью и долговечностью.

SOLIDWORKS Simulation Premium позволяет решать три типа сложных задач: нелинейные статические, нелинейные динамические и линейные динамические. Линейные динамические задачи основываются на результатах частотного анализа и заключаются в определении напряжений при вибрационных нагрузках. Инженеры получают информацию о воздействии динамических (в том числе ударных) нагрузок и могут даже исследовать реакцию линейных упругих материалов на землетрясения [15, 105, 117].

Средства нелинейного анализа предоставляют инженерам сведения о поведении изделий из различных материалов: металла, резины, пластмасс и т. п. При этом учитываются большие деформации и сила трения скольжения.

В нелинейных статических задачах подразумевается, что конструкция подвергается статическим нагрузкам, которые могут действовать на нее с заданной очередностью. Учет материалов в модели позволяет определять остаточные деформации и напряжения, возникающие из-за повышенных нагрузок, а также моделировать пружины и зажимные приспособления.

В нелинейных динамических задачах в расчет принимаются действующие в реальном времени переменные нагрузки. К возможностям нелинейного статического анализа здесь добавляется расчет эффекта от ударных воздействий.

SOLIDWORKS Simulation Premium позволяет инженерам исследовать реальное поведение изделий, не прибегая к каким-либо упрощениям.

### 3.2 Рабочая среда ANSYS FLUENT

В настоящее время программа ANSYS представляет собой многоцелевой пакет проектирования и анализа, признанный во всем мире. Первая реализация программы значительно отличалась от последних ее версий и касалась только решения задач теплопередачи и прочности в линейной постановке. Как и

большинство других программ того времени, она работала в пакетном режиме и лишь на «больших» машинах. В начале 70-х годов в программу было внесено много изменений в связи с внедрением новой вычислительной технологии и реализацией запросов пользователей. Были добавлены нелинейности различной природы, появилась возможность использовать метод подконструкций, была расширена библиотека конечных элементов. Компания обратила внимание на появившиеся в то время миникомпьютеры и векторные графические терминалы. В течение нескольких лет эти новые аппаратные средства были освоены программными разработками фирмы, породив новую эру компьютерного решения инженерных задач [104, 105].

В конце 70-х годов существенным дополнением к программе ANSYS явился интерактивный режим работы. Это значительно упростило процедуры создания конечно-элементной модели и оценку результатов (пре- и постпроцессорная обработка). Стало возможным использовать интерактивную графику для проверки геометрии модели, заданных свойств материала и граничных условий перед началом счета. Графическая информация могла быть сразу же выведена на экран для интерактивного контроля результатов решения. Сегодня ANSYS – это чрезвычайно мощная и удобная программа. Каждая ее версия включает новые и расширяет прежние возможности пакета, что делает программу быстродействующей, более гибкой и удобной. Эти ее качества помогают пользователям справиться с непрерывно возрастающими запросами современного промышленного производства. Программа ANSYS – это гибкое, надежное средство проектирования и анализа. Она работает в среде операционных систем самых распространенных компьютеров – рабочих станций и суперкомпьютеров. Особенностью программы является файловая совместимость всех членов семейства ANSYS для всех используемых платформ. Многоцелевая направленность программы (т. е. реализация в ней средств для описания отклика системы на воздействия различной физической природы) позволяет использовать одну и ту же модель для решения таких связанных задач, как прочность при тепловом нагружении, влияние магнитных полей на прочность конструкции, тепломассоперенос в электромагнитном поле. Модель, созданная на PC, может использоваться на суперкомпьютере. Это обеспечивает всем пользователям программы удобные возможности для решения широкого круга инженерных задач. Как новичкам, так и опытным пользователям эта программа предлагает непрерывно растущий перечень расчетных средств, которые могут учесть разнообразные конструктивные нелинейности; дают возможность решить самый общий случай контактной задачи для поверхностей; допускают наличие больших (конечных) деформаций и углов поворота; позволяют выполнить интерактивную оптимизацию и анализ влияния электромагнитных полей, получить решение задач гидроаэродинамики и многое другое – вместе с параметрическим моделированием, адаптивным перестроением сетки, использованием элементов и обширными возможностями создания макрокоманд с помощью языка параметрического проектирования программы ANSYS (APDL). Система меню (на основе разработки

фирмы Motif) обеспечивает ввод данных и выбор действий программы с помощью панелей диалога, выпадающих меню и окон списка, помогая пользователю управлять программой. Средства твердотельного моделирования включают в себя представление геометрии, основанное на использовании сплайновой технологии NURBS, геометрических примитивов и операций булевой алгебры (выполняемых модулем SHAPESä фирмы XOX Corp., который встроен в программу ANSYS). Модуль программы ANSYS Design Data Accessä (DDA) обеспечивает передачу в программу моделей, созданных средствами компьютерного проектирования (CAD), что исключает повторение выполненной прежде работы. Назначение модуля DDA состоит в том, чтобы дать пользователю возможность получить результаты конечно-элементного анализа, которые в полной мере обусловлены исходной информацией, содержащейся в проектной разработке, а также предоставить современные и самые совершенные средства обмена данными. Программные средства серии DDA Connection могут работать совместно с разработками многих ведущих поставщиков CAD-программ, включая компании Parametric Technology Corporation, EDS/Unigraphics и Computervision Corporation. Последней версией этой серии является программное средство DDA Interactive, позволяющее использовать для конечно-элементного анализа непосредственно CAD-модели за счет современного интерфейса и установлению взаимосвязи между CAD-информацией и данными, требующимися для проведения анализа. Кроме того, возможности анализа и оптимизации программы ANSYS легко переносятся на CAD-модели за счет использования форматов IGES и STEP для пересылки геометрии или соответствующего интерфейса ведущих CAD программ.

Программа ANSYS является средством, с помощью которого создается компьютерная модель или обрабатывается CAD-модель конструкции, изделия или его составной части; прикладываются действующие усилия или другие проектные воздействия; исследуется отклики системы различной физической природы в виде распределений напряжений и температур, электромагнитных полей. Программа используется для оптимизации проектных разработок на ранних стадиях, что снижает стоимость продукции. Все это помогает проектным организациям сократить цикл разработки, состоящий в изготовлении образцов прототипов, их испытаний и повторном изготовлении образцов, а также исключить дорогостоящий процесс доработки изделия.

В ряде случаев испытания образцов являются нежелательными или невозможными. Разработчики, использующие программу ANSYS, могут выявить возможные недостатки проекта или найти его оптимальный вариант до начала изготовления или эксплуатации продукции. Конечно-элементный анализ с помощью программы ANSYS может помочь значительно уменьшить расходы на проектирование и изготовление, добавить уверенности разработчику в правильности принятых им решений. Программа ANSYS может быть положена в основу сквозной подготовки студентов ряда специальностей, начиная с первого курса и заканчивая дипломным проектом. На младших курсах студенты могут ознакомиться с возможностями геометрического моделирования сложных

конструкций средствами ANSYS, а также пересылки геометрии из CAD программ путем использования стандартных графических форматов IGES и STEP. Данная программа представлена на рисунке 3.2. Далее, в курсе теоретической механики, с помощью ANSYS могут решаться задачи статики, кинематики и динамики. Решение целого ряда задач может быть освоено студентами и в последующих курсах общепрофессиональных и специальных дисциплин. Благодаря наличию в ANSYS модулей теплового и гидроаэродинамического анализа, а также анализа электромагнитных, электрических полей и пьезоэлектрических явлений программа также может быть использована при подготовке специалистов по ряду специальностей большинства факультетов университета.

Рисунок 3.2 – Программа ANSYS

Программный модуль ANSYS FLUENT имеет широкий спектр возможностей моделирования течений жидкостей и газов для промышленных задач с учетом турбулентности, теплообмена, химических реакций. К примерам применения FLUENT можно отнести задачи обтекания крыла, горение в печах, внешнее обтекание нефтедобывающих платформ, течение в кровеносной системе, конвективное охлаждение сборки полупроводника, вентиляция в помещениях, моделирование промышленных стоков. Специализированные модели горения, аэроакустики, вращающихся/неподвижных расчетных областей, многофазных течений серьезно расширяют области применения базового продукта [103, 106].

ANSYS FLUENT — это удобный, отказоустойчивый инструмент, позволяющий даже новичкам достигать высокой производительности труда. Интеграция модуля ANSYS FLUENT в рабочую среду ANSYS Workbench, а также возможность

использования модуля ANSYS CFD-Post для обработки результатов создает комплексное решение для выполнения инженерного анализа в области моделирования течений жидкостей и газов.

Технология ANSYS FLUENT является лидером по числу сложных физических моделей, предлагаемых для расчетов на неструктурированных сетках.

На рисунке 3.3 представлены наборы элементов различных форм: четырехугольники и треугольники для двумерных расчетов, гексаэдры, тетраэдры, полиэдры, призмы, пирамиды для трехмерных расчетов.

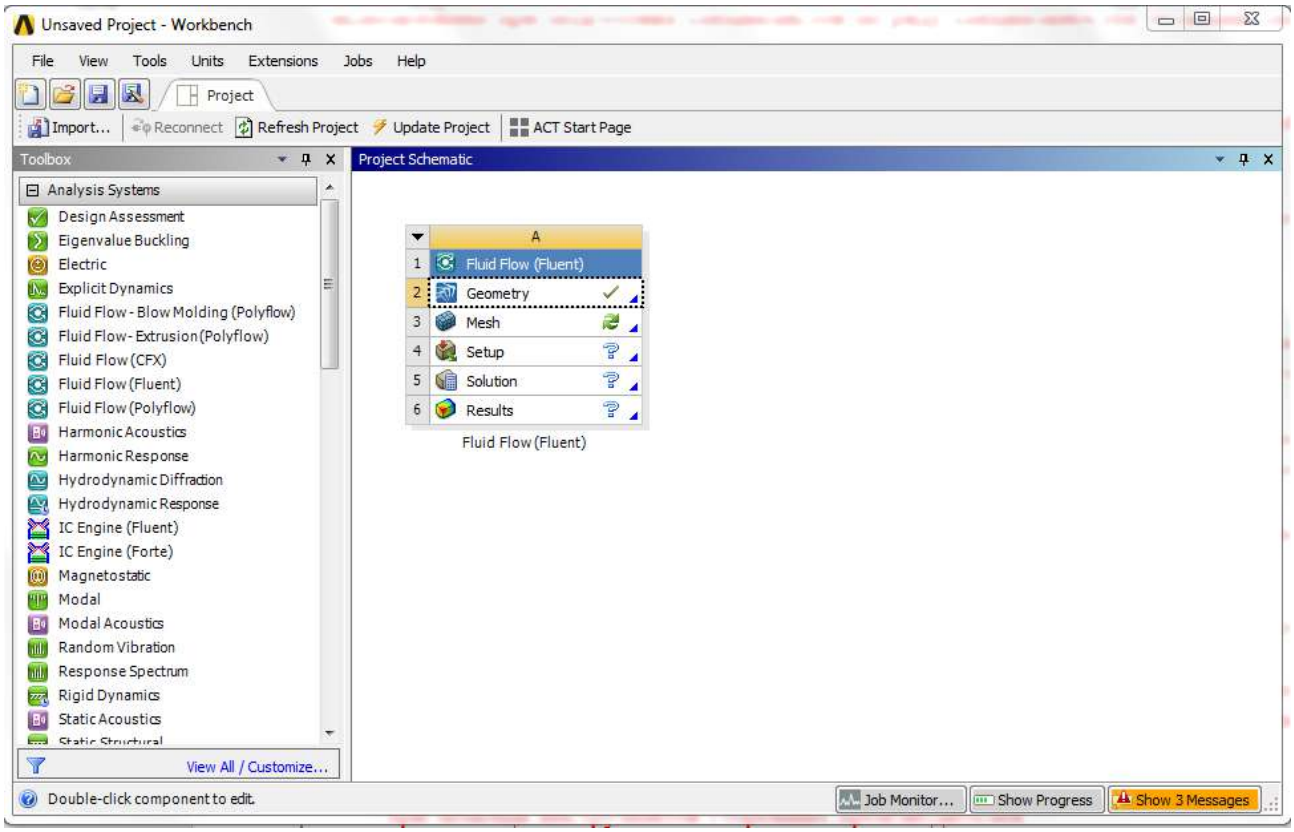


Рисунок 3.3 – Панель инструментов ANSYS

Сетки можно строить при помощи инструментов компании ANSYS или при помощи инструментов сторонних производителей. ANSYS FLUENT включает в себя сложные числовые отказоустойчивые решатели, в том числе сопряженный решатель с алгоритмом на основе давления, расщепленный решатель с алгоритмом на основе давления и два решателя с алгоритмами на основе плотности, что позволяет получать точные результаты для практически любого течения.

FLUENT предлагает универсальное решение для создания расчетных сеток любых типов — набор программных продуктов, состоящий из GAMBIT, Tgrid и G/Turbo. Последний является своеобразным аналогом TurboGrid, но значительно уступает ему по функциональным возможностям. Отметим, что в отличие от ANSYS CFX, FLUENT поддерживает некомфорные сетки, сгенерированные в GAMBIT. Качество получаемых на основе проведения вычислительного

эксперимента результатов напрямую зависит от качества построенной расчетной сетки с помощью функций на рисунке 3.4.

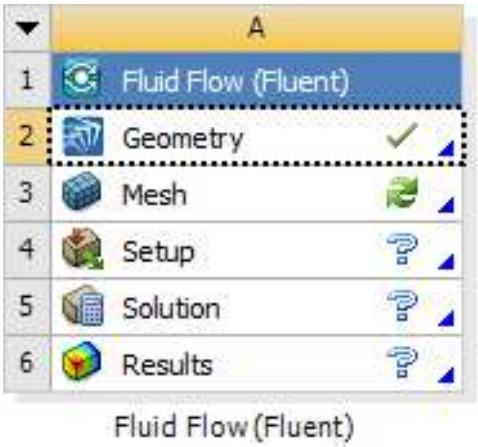


Рисунок 3.4 – Сеточный генератор GAMBIT

Предпроцессор GAMBIT позволяет быстро создавать и обрабатывать геометрии исследуемых процессов. GAMBIT имеет единый интерфейс для создания геометрических моделей и построения сетки. Кроме того, в процессе его использования производится запись всех операций построения в текстовый файл (журнал событий), что дает возможность пользователю легко отслеживать путь создания геометрической модели, исправлять ошибки, перестраивать модели и сетки, а также интегрировать результаты в другие программы.

GAMBIT может импортировать геометрию из различных CAD программ. Часто во время импорта геометрии возникают проблемы нестыковки объектов. GAMBIT имеет встроенный модуль поиска и исправления подобных проблем, что значительно упрощает процесс создания модели.

GAMBIT обладает мощными возможностями для создания двухмерных и трехмерных расчетных областей непосредственно внутри программы, начиная от построения линий и сплайнов, кончая созданием твердотельных объектов. Встроенный специализированный модуль G/Turbo позволяет автоматизировать создание геометрических моделей лопаточных машин [102].

GAMBIT обладает мощным генератором сеток, позволяющим создавать разнообразные типы сеток: структурированную гексаэдальную сетку, автоматическую (неструктурированную) гексаэдальную и тетраэдальную сетки.

Кроме того, в нем имеется возможность создания пограничных слоев с комбинированными сетками. После построения сетки пользователь имеет возможность проверить ее качество по разнообразным параметрам (скошенность элементов, соотношение сторон).

Интерфейс пользователя.

Несмотря на то, что программа ANSYS располагает богатыми и сложными возможностями, ее организационная структура и «дружеский» графический интерфейс пользователя (GUI) делают изучение и применение программы очень

удобным. Используется отвечающий современным требованиям интерфейс, созданный на основе разработки Motif Standard.

С помощью этого интерфейса обеспечивается удобный интерактивный доступ к функциям, командам, документации и справочным материалам программы, создается своего рода путеводитель, обучающий пользованию программой шаг за шагом при проведении анализа. В то же время программой предоставляется полная документация в интерактивном режиме и самая современная система HELP на основе гипертекстового представления для помощи опытным пользователям при выполнении сложных видов работ. Система меню наделена «интуитивными» свойствами, помогая пользователю целесообразно управлять программой. Исходные данные можно вводить с помощью манипулятора «мышь», клавиатуры или сочетая эти два варианта.

Существуют четыре общих метода ввода инструкций для программы, когда используются следующие возможности интерфейса:

– меню;
– панели диалога;
– линейка инструментов;
– непосредственный ввод команд.

Меню представляет собой перечень нескольких логически связанных процедур управления программой, которые расположены в отдельных окнах. К этим окнам, которые можно переместить или убрать с помощью мыши, доступ возможен в процессе работы. Команды программы объединены в отдельные функциональные группы для быстрого доступа в соответствующие моменты. Семь основных меню или оконных областей включают в себя следующее:

а) Меню утилит - содержит набор часто используемых процедур, которые отображены здесь для доступа в любой момент работы программы. Выполнению этих процедур предшествует появление в каскадном порядке выпадающих меню, которые позволяют выполнить нужное действие или перейти в панель диалога. Меню утилит не обладает жестким режимом работы, и пользователь может выполнить несколько действий за одно обращение (например, отказаться от прежнего намерения и перейти к выполнению другой операции).

б) Главное меню - перечисляет основные функции программы, которые группируются в располагаемые сбоку всплывающие (динамические) меню, вид которых зависит от продвижения по программе.

в) Окно ввода - представляет собой область для набора команд и показа сообщений-подсказок программы. Имеется возможность обратиться к списку введенных ранее команд. Команды можно извлекать из файла регистрации (log-файла) введенных ранее команд и/или входных файлов для последующего ввода.

г) Графическое окно - представляет собой область для вывода такой графической информации, как конечно-элементная модель или графики результатов анализа. Размеры окна можно устанавливать, уменьшая или увеличивая по своему усмотрению.

д) Окно вывода - фиксирует отклик программы на команды и действия пользователя. Всегда доступно при работе графического интерфейса.

ж) Линейка инструментов - дает возможность пользователю разместить обычно используемые процедуры, например, команды или написанные пользователем подпрограммы для быстрого их запуска щелчком мыши.

Графические возможности.

Полностью интерактивная графика (т. е. средства и системы ввода, отображения и редактирования изображений) является составной частью программы ANSYS. Графика важна для проверки исходных данных и просмотра результатов решения на этапе постпроцессорной обработки.

Модуль PowerGraphics обладает значительной скоростью построения геометрических объектов и графиков результатов. Высокая скорость достигается за счет сохранения геометрии как некоторого «готового» объекта в памяти машины, а не построением ее всякий раз заново. Средства визуализации этого модуля пригодны для изображения элементов сетки и областей равных значений напряжений как при использовании p-элементов, так и h-элементов.

Возможности модуля PowerGraphics позволяют быстро выдавать изображения: изоповерхностей (т. е. поверхностей равного значения какой-либо величины); графических объектов, разделенных на составные части, в виде одной сборки или совокупности так называемых Q-разрезов (в виде тонких «ломтиков»); Q-разрезов с топологическими деталями. Графические средства программы ANSYS включают следующее:

– отображение граничных условий на твердотельных и конечно-элементных моделях;

– представление результатов цветными областями равных значений;

– графики зависимостей полученных результатов от времени или от некоторого расстояния в пределах расчетной модели;

– преобразование изображений общего характера (смена направления взгляда, распахивание окна до максимального размера, укрупнение плана, вращение);

– растягивание твердотельных примитивов;

– многооконный режим работы;

– показ невидимых линий, сечений и перспективных изображений;

– программное средство для Z-буферирования (плавное затенение и быстрая «отрисовка» объекта);

– изображение теней на объекте от источника света;

– повышение ясности изображения (удаление внутренних линий, разделение смежных линий элемента и выбор независимого масштаба изображения по вертикали и горизонтали);

– создание композиции из нескольких объектов (например, дополнение твердотельной модели);

– наличие палитры до 256 цветов;

– трехмерная визуализация, включающая изображение градиентов, изоповерхностей, траекторий частиц потока и разрезов объемов;

– аппроксимация графиков X-Y с помощью широкого набора кривых, их двумерное и объемное представление; выбор цветовой гаммы графиков, фона и линий сетки, выбор толщин линий;

– графическое отображение длительности процедур построения сетки, подготовки листинга и процесса решения задачи;

– средства дополнения графических изображений текстом, размерными линиями, фигурами, символами, круговыми диаграммами и т. п.;

– средства анимации для отображения изменений деформированной формы, результатов счета в зависимости от времени, «оживления» Q-разрезов и изоповерхностей;

– цветовая индикация большинства графических объектов (элементов сетки, линий, областей, объемов, граничных условий, окраски экрана, контурных линий и индексов) в зависимости от их ранга или типа;

– полупрозрачные изображения для элементов, твердотельных объектов, составных частей группы объектов и изоповерхностей;

– показ истинной формы и поперечного сечения трубопроводов, патрубков, балок и магнитов;

– показ отдельных слоев композитных материалов и их пространственной ориентации;

– разделение окон по цвету фона;

– сохранение в файле спецификаций вывода на экран для повторного обращения к ним;

– средства получения твердых копий графики, включая системы Postscript, HPGL и TIFF.

Построение сетки.

Программа ANSYS делает возможным быстрое и удобное построение сетки высокого качества для CAD-моделей. При этом используются многочисленные средства управления качеством сетки.

После того как построена твердотельная модель, ее конечно-элементный аналог (т. е. сетка узлов и элементов) может быть создана всего лишь одним обращением к меню программы. В программе ANSYS предусмотрено четыре способа генерации сетки: использование метода экструзии, создание упорядоченной сетки, создание произвольной сетки (автоматически) и адаптивное построение.

Метод экструзии (выдавливания) используется для превращения областей двумерной сетки в трехмерные объекты, состоящие из параллелепипедов, клиновидных элементов или их комбинации. Процесс экструзии осуществляется с помощью процедур смещения из плоскости, буксировки, поступательного и вращательного перемещений.

Построение упорядоченной сетки требует предварительного разбиения модели на отдельные составные части с простой геометрией, а затем выбора таких атрибутов элемента и соответствующих команд управления качеством сетки, чтобы можно было построить конечно-элементную модель с упорядоченной сеткой. Создаваемая программой ANSYS упорядоченная сетка может состоять из

шестиугольных, четырехугольных и треугольных элементов. Для получения треугольной сетки программа выделяет области модели, представленной на рисунке 3.5, предназначенные для нанесения упорядоченной сетки, создает сначала четырехугольную сетку, а затем превращает ее в сетку из треугольных элементов. Такой способ построения сетки является весьма удобным как при создании сетки из тетраэдров (описывается ниже), так и при нанесении сетки на жестких поверхностях при решении контактных задач, где предпочтительно сводить число конечных элементов к минимуму.

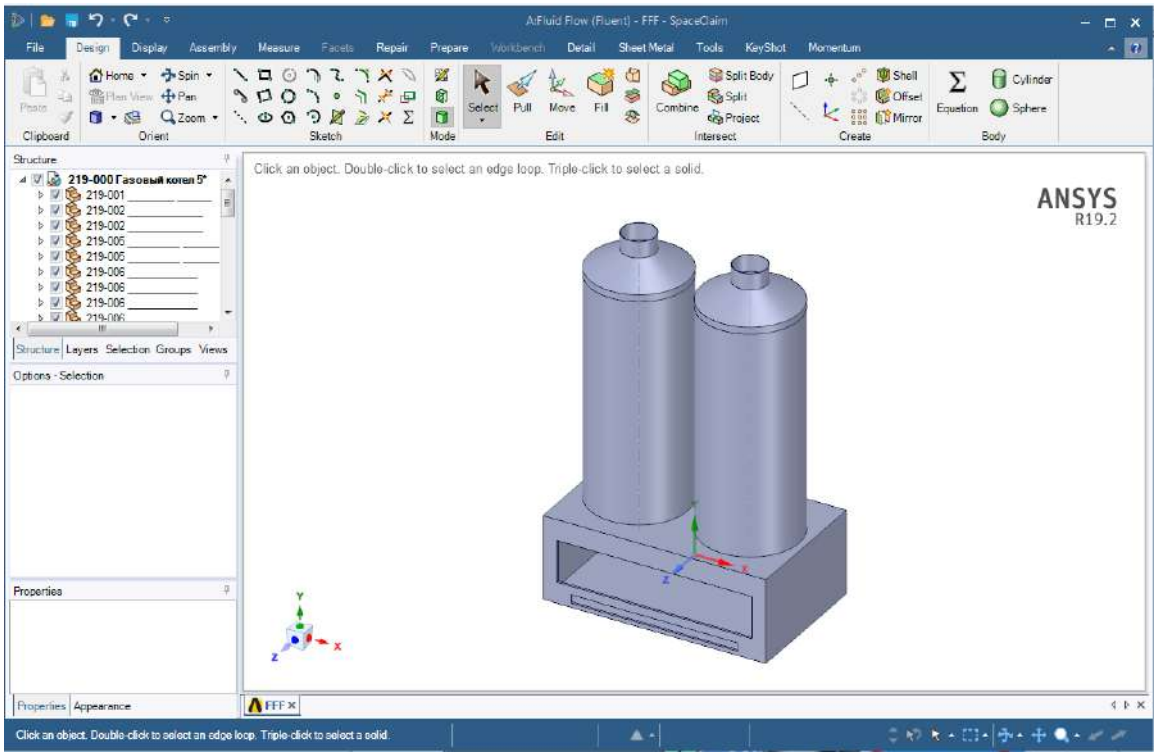


Рисунок 3.5 – Построение графического эскиза

В качестве дополнительного способа построения упорядоченной сетки на некоторой поверхности используется деление противоположных граничных линий этой поверхности таким образом, чтобы можно было осуществить переход от одного размера сетки к другому. Построение упорядоченной сетки переменного размера возможно только для поверхностей, ограниченных четырьмя линиями (с использованием или без использования конкатенации, т. е. операции объединения двух последовательностей граничных линий в одну, при этом первая последовательность становится началом результирующей, а вторая - ее хвостом).

Программа ANSYS предоставляет в распоряжение пользователя надежные генераторы произвольной сетки, с помощью которых она может наноситься непосредственно на модель достаточно сложной геометрии - без необходимости строить сетку для отдельных частей и затем собирать их в единую модель. Произвольную сетку можно строить из треугольных, четырехугольных и четырехгранных элементов. Генераторы произвольной сетки имеют в наличии

основной и дополнительный построители, что повышает гибкость выбора для пользователя и вероятность получения сетки удовлетворительного качества [35].

Генератор тетраэдной сетки позволяет получить объемную сетку высокого качества. Он обеспечивает одношаговое построение сетки после интенсивной проверки модели, а затем выполняет этап улучшения готовой сетки. На подготовительной стадии проверяется, нет ли взаимопересечения граничных граней и правильность их ориентации, а пользователю сообщается информация о возможных проблемах или невозможности построения сетки.

Генераторы произвольной сетки обладают широким набором внутренних и внешних опций управления качеством сетки. Так, например, реализован алгоритм разумного выбора размеров конечного элемента, позволяющий строить сетку элементов с учетом кривизны поверхности модели и наилучшего отображения ее реальной геометрии. Пользователь может выбрать мелкую или крупную сетку элементов, указав в качестве управляющего параметра любое число из диапазона от единицы до десяти. Кроме того, каждый из этих генераторов снабжен самыми современными алгоритмами сглаживания и рафинирования размеров сетки, что снижает число элементов неудовлетворительной формы и прерываний процедуры построения сетки. Другие доступные средства управления качеством сетки включают: указание общего размера элемента, деление граничной линии, размеры в окрестности заданных геометрических точек, коэффициенты растяжения или сжатия вдали от границ, ограничения на кривизну и возможность задания «жестких» точек (т. е. задание точного положения узла вместе с размерами сетки в такой точке). Поскольку тетраэдный генератор работает с учетом размера сетки на соседних частях модели, пользователь имеет возможность указать нужную сетку на границе области до обращения к генератору.

Адаптивное построение сетки состоит в том, что после создания твердотельной модели и задания граничных условий программа, по указанию пользователя, генерирует конечно-элементную сетку, выполняет анализ, оценивает ошибку за счет сеточной дискретизации и меняет размер сетки от решения к решению до тех пор, пока расчетная погрешность не станет меньше некоторой наперед заданной величины (или пока не будет достигнуто установленное число итераций).

Адаптивное построение модели возможно использовать для статического линейного анализа или стационарного теплового расчета. Такая процедура создания сетки может быть выполнена и при наличии нескольких разных условий нагружения. Кроме того, пользователь имеет возможность указать те области расчетной модели, для которых уменьшение ошибки дискретизации не столь важно, и исключить их из адаптивной процедуры. Пользователь может настроить процедуру адаптивного построения сетки, исходя из индивидуального подхода к проведению анализа.

Возможности программы ANSYS допускают проведение модификации конечно-элементной сетки. Например, могут быть изменены атрибуты узлов и элементов. Если модель состоит из повторяющихся областей, то можно создать сетку только для некоторой области модели, а затем сделать копию этой области.

После того как геометрическая модель покрывается сеткой конечных элементов, программа автоматически обеспечивает их взаимоперекрестный контроль, чтобы гарантировать правильность выполняемых пользователем видоизменений сеточной модели. Такие проверки предотвращают некорректное уничтожение или порчу данных, относящихся к твердотельной и сеточной моделям. Так, например, ключевые точки, линии, поверхности или объемы сеточной модели нельзя уничтожить или переместить до тех пор, пока пользователь явным образом не потребует от программы отменить их автоматический контроль [63-64].

К другим видам модификации сетки, нанесенной на твердотельную модель, относятся ее измельчение и улучшение формы тетраэдных элементов, показанных на рисунке 3.6. Треугольная, четырехугольная и тетраэдная сетки (или произвольное их сочетание) можно локально измельчать, используя интерактивные и «интуитивные» средства. Тетраэдную сетку, независимо от способа ее построения, можно улучшить с помощью процедуры, которая кроме модификации положений узлов, позволяет вводить, удалять и переставлять конечные элементы, обеспечивая тем самым получение сетки высокого качества.

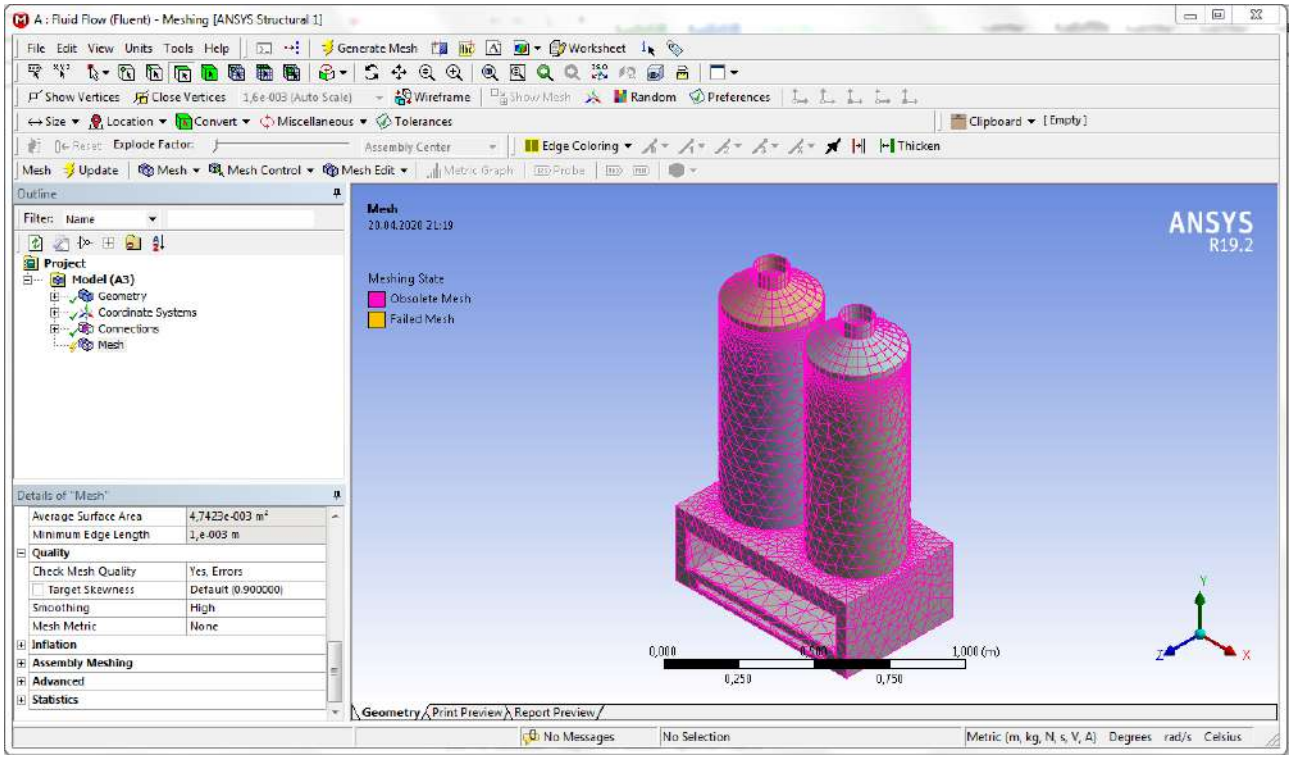


Рисунок 3.6 – Сеточная модель

Получение решения.

Пользователь получает результаты анализа на стадии решения, после того как в процессе препроцессорной подготовки построена расчетная модель. Эта фаза применения программы ANSYS состоит в задании вида анализа и его опций, нагрузок и шага решения и заканчивается запуском на счет конечно-элементной задачи.

Выбранный вид анализа указывает программе, какие разрешающие уравнения следует использовать для решения данной задачи. Самый общий набор доступных категорий расчета состоит из средств решения прочностных и тепловых задач, средств анализа при действии электростатических, электрических и электромагнитных полей, решения задач гидроаэродинамики и связанных задач.

Каждая категория расчетов включает несколько их отдельных типов, как например, статический и динамический типы прочностных расчетов. Выбором опций можно дополнительно определить особенности проводимого анализа. Так, например, для решения нелинейных уравнений имеется возможность указать один из нескольких вариантов метода Ньютона-Рафсона.

Заданные нагрузки и ограничения определяют граничные условия для расчетной модели. К нагрузкам относятся ограничения степеней свободы, сосредоточенные, распределенные, объемные и инерционные усилия. Конкретный вид нагрузок зависит от вида проводимого анализа (например, приложенная в точке нагрузка может быть сосредоточенной силой при прочностном анализе или тепловым потоком при расчете теплопередачи).

Каждое заданное сочетание (конфигурация) нагрузок называется шагом нагружения, и анализ может состоять из одного или более таких шагов. Значения нагрузки для данного шага нагружения могут меняться постепенно от шага к шагу (т. е. нагрузка может быть плавной, иметь наклонный участок) или меняться скачком за один шаг. Последний вариант можно использовать, например, для моделирования резкого нагружения при анализе переходных, нестационарных процессов.

Опции шага нагружения используются для организации массивов выходных величин, управления сходимостью решения и обычного определения нагрузок на шаге нагружения. Так, например, пользователь может задать число дополнительных, более мелких, шагов в пределах одного шага нагружения или указать, должна ли нагрузка меняться плавно на данном шаге нагружения.

Для указания допустимых пределов изменения степеней свободы в узлах модели могут использоваться заданные условия-ограничения. Например, в соответствии с требованиями прочностного анализа могут быть ограничены повороты и смещения узлов на закрепленном крае объекта расчета. Кроме возможности задавать ограничения на стадии получения решения, существует возможность делать это при препроцессорной подготовке, используя твердотельную или конечно-элементную модель. Ограничения степеней свободы, заданные на твердотельной модели, автоматически передаются программой в сеточную модель при инициализации процедуры численного решения.

На стадии получения решения имеется возможность изменить свойства материала и атрибуты конечного элемента, например, толщину, активизировать или деактивировать элементы (опции «есть» - birth и «нет» - death), указать ведущие степени свободы (MDOF) и определить условия в зазорах.

После того как все соответствующие параметры заданы, может быть выполнено и само решение. Пользователь поручает программе решить определяющие

уравнения и получить результаты для выбранного вида анализа. В вычислительном отношении это самая интенсивная часть анализа, не нуждающаяся, однако, во вмешательстве пользователя. Она требует самых значительных затрат компьютерного времени и минимальных затрат времени пользователя.

Для того чтобы получить решение за минимальное время, программа ANSYS переупорядочивает расположение элементов и узлов.

Методы решения уравнений.

Все типы расчетов, выполняемые программой ANSYS, основаны на классических инженерных представлениях и концепциях. При помощи надежных численных методов эти концепции могут быть сформулированы в виде матричных уравнений, которые наиболее пригодны для конечно-элементных приложений.

Совокупность дискретных областей (элементов), связанных между собой в конечном числе точек (узлов), представляет собой математическую модель системы, поведение которой нужно анализировать. Основными неизвестными являются степени свободы узлов конечно-элементной модели. К степеням свободы относятся перемещения, повороты, температуры, давления, скорости, потенциалы электрических или магнитных полей; их конкретное содержание определяется типом элемента, который связан с данным узлом. В соответствии со степенями свободы для каждого элемента модели формируются матрицы масс, жесткости (или теплопроводности) и сопротивления (или удельной теплоемкости). Эти матрицы приводят к системам совместных уравнений, которые обрабатываются так называемыми «решателями».

Набор степеней свободы, присутствующих в общей матрице на данный момент, называется волновым фронтом, который расширяется или сужается по мере того, как неизвестные вводятся в систему уравнений или исключаются из нее. После прохождения волнового фронта через все элементы и вычисления всех неизвестных можно переходить к стадии постпроцессорной обработки для отображения полученных результатов для всей модели в целом.

Решатели явного типа, к которым относится фронтальный решатель, определяют точное решение для совместной системы линейных уравнений. Фронтальный решатель одновременно формирует общую для нескольких элементов матрицу жесткостей, состоящую из индивидуальных матриц элементов, и решает систему уравнений. Эта процедура последовательно продвигается через всю модель, элемент за элементом, вводя уравнения, соответствующие степеням свободы отдельного элемента. В это же время определяются основные неизвестные и исключаются (на основе метода Гаусса) из общей матрицы, как только это становится возможным.

Фронтальный решатель программы ANSYS использует так называемый Rank-n алгоритм, обеспечивающий параллельную обработку системы уравнений, т. е. вычисление основных неизвестных не порознь, а группами. Для оптимального использования программой аппаратных средств, которые поставляются на рынок различными разработчиками, она настраивается выбором размера определяемой группы неизвестных, т. е. выбором параметра *n*.

Фронтальный решатель весьма эффективен для задач небольшого и среднего размера.

Программа ANSYS располагает эффективным решателем явного типа для разреженных матриц, используемый при линейном и нелинейном анализе. Этот решатель может применяться как альтернатива итеративным решателям для статических и динамических задач, где требуется совместить надежность результатов с малыми затратами времени. В решателе используется прямое исключение уравнений для столь плохо обусловленных матриц системы, что получение решения не представляет труда. Такой решатель выгодно использовать как при нелинейном анализе, когда статус контактных элементов может менять топологию модели и оказывать влияние на ширину волнового фронта, так и при любом другом анализе, для которого расчетная модель представляет собой разветвленную структуру, приводящую к нескольким волновым фронтам, как в случае турбинного диска или выхлопного коллектора автомобиля. Решатель можно использовать только для вещественных симметричных матриц. В зависимости от топологии модели рассматриваемый решатель может дать существенное ускорение решения по сравнению с фронтальным или иным другим решателем явного типа.

В качестве альтернативы фронтальному решателю можно использовать любой из итеративных, которые сокращают время решения.

Тепловой анализ.

В программе ANSYS реализованы расчетные средства для трех видов теплообмена: кондуктивного, конвективного (свободного и вынужденного) и радиационного. Эти средства используются при проведении стационарного, нестационарного, линейного или нелинейного теплового анализа [37, 56].

Для конечно-элементного представления системы разрешающее уравнение процесса теплопередачи имеет вид (60):

$$[C] \cdot \{T\} + [K] \cdot \{T\} = \{Q\}, \qquad (60)$$

где $[C]$ – матрица удельных теплоемкостей;

$\{T\}$ – производная по времени температуры в узле;

$[K]$ – матрица эффективной теплопроводности;

$\{T\}$ – вектор узловых температур;

$\{Q\}$ – вектор эффективного теплового потока в узле.

С помощью программы ANSYS можно выполнить тепловой анализ для следующих задач:

– стационарная теплопроводность;

– неустановившийся температурный режим;

– фазовые превращения;

– расчет температурных напряжений и деформаций.

Стационарная теплопроводность.

Стационарный тепловой анализ определяет установившееся распределение температур в конструкции и кондуктивные тепловые потоки. Можно задавать такие «нагрузки», как конвективная теплоотдача с поверхности, тепловые потоки, плотность тепловых потоков, мощность тепловых источников и заданные температуры. Анализ может быть линейным или нелинейным [36].

В линейном установившемся процессе теплопередачи отсутствует влияние «тепловых» масс (удельных теплоемкостей) и не учитывается зависимость теплофизических свойств материала от температуры. Производная температуры по времени $\{T\}$ равна нулю, а коэффициенты матрицы эффективной теплопроводности постоянны. В этом случае разрешающее уравнение приводится к виду (61):

$$[K] \cdot \{T\} = \{Q\}. \tag{61}$$

Эта система линейных совместных уравнений применяется для расчета процессов кондуктивного и линейного конвективного переноса тепла.

В нелинейном стационарном анализе теплопередачи не рассматриваются эффекты, зависящие от времени (отсутствуют «тепловые» массы). Однако теплофизические свойства материалов (включая и коэффициент конвективной теплоотдачи с поверхности) могут меняться с температурой; кроме того, может иметь место лучистый теплообмен.

Механизм радиационного теплообмена описывается тремя различными способами. Для моделирования переноса тепла излучением между двумя точками пространства используется линейный радиационный конечный элемент. Для описания радиационного теплообмена между поверхностью и точкой используется конечный элемент поверхностного излучения. При решении задач, относящихся к нескольким поглощающим и излучающим поверхностям, используется матричный генератор. В последнем случае имеется возможность учесть полное или частичное перекрытие поверхностей, также как и задать узел в пространстве, который поглощает или излучает энергию. В общем случае переноса тепла излучением плотность радиационного теплового потока $\{Q\}$ является функцией скорее $T_4$ , чем $T$, т. е. характер процесса явно нелинейный [37, 38].

В нелинейном анализе матрица теплопроводности является функцией температуры, и решение задачи достигается применением итераций. В программе ANSYS итеративная процедура имеет своей основой метод Ньютона-Рафсона, который предполагает решение последовательности линейных задач для получения нелинейного приближения. Таким образом, уравнение для нелинейной стационарной задачи теплопроводности имеет вид (62):

$$[K]_i \cdot \{\Delta T\}_{i+1} = \{Q^A\} - \{Q^{NR}\}_i, \tag{62}$$

где $i$ - номер итерации.

Это уравнение на первой итерации решается при некоторой начальной температуре (которая может быть задана пользователем); в последующих итерациях для вычисления коэффициентов матрицы теплопроводности используются значения температур, полученные на предыдущей итерации. Процесс итераций продолжается, пока не достигается сходимость решения, т. е. пока не будет выполнен установленный пользователем критерий сходимости. Сходимость контролируется по величине невязки вектора нагрузок (потока тепла) и/или по изменению температуры от итерации к итерации [39].

Результаты решения, для линейного и нелинейного анализа, представляют собой значения температуры и плотности теплового потока в узлах. Эти данные могут быть использованы при постпроцессорной обработке для построения картины изотерм в расчетной модели. Средства постпроцессора можно использовать для получения такой специфической информации, как значения температурных градиентов или потоков в узлах и в центре элемента, а также плотность теплового потока через поверхности излучения (поглощения). Информация выводится в табличной или графической форме.

### 3.3 Результаты компьютерного моделирования

Инженерная компьютерная графика считается в нашей стране самой развивающейся отраслью технических знаний. Но процесс создания нового изделия требует наличия времени и материальных затрат, а также состоит из проектирования и изготовления. Для облегчения процесса работы создана специальная программа SolidWorks, которую положительно оценили пользователи.

SolidWorks: что это за программа, и чем она интересна.

Программный продукт SolidWorks является самым распространенным инструментом, используемым для автоматизированного проектирования (САПР) и 3D моделирования. Пакет позволяет создать детали для предстоящей 3D печати. Это защищает проектанта от всевозможных ошибок, которые неизбежно появляются в процессе начертания проекций изделия вручную.

Программа для проведения трехмерного проектирования под названием SolidWorks в процессе работы использует привычный многим пользователям интерфейс Windows и при этом является полностью русифицированной. Все методические пособия также представлены на русском языке во всех доступных версиях [43].

Исследование процесса горения проводилось в программном пакете ANSYS Fluent. Моделирование проводилось поэтапно. Построена геометрия твердотельного объекта в программной платформе DesignModeler. Выбрана расчетная сетка в сеточном генераторе Mesh. Заданы граничные условия и основные характеристики в CFX-Pre. Получено решение в виде графиков и вычислений на платформе CFX-Solver. Результаты расчетов представлены графически и отражают температурные и скоростные поля. В качестве

топлива в данной задаче использовался природный газ, а в качестве окислителя воздух.

Для моделирования работы ГГУ использовались программные пакеты «ANSYS Fluent» и «STAR–CCM+» (лицензионное соглашение № 60734258).

Использовался метод конечных объёмов. Для условия установившегося изотермического движения вязкой несжимаемой жидкости без учёта сил гравитации используется система дифференциальных уравнений Навье–Стокса в виде (63):

$$\begin{gathered}\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}+w\frac{\partial u}{\partial z}=F_x-\frac{1}{p}\cdot\frac{\partial p}{\partial x}+v\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\\ \frac{\partial v}{\partial t}+u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}+w\frac{\partial v}{\partial z}=F_y-\frac{1}{p}\cdot\frac{\partial p}{\partial y}+v\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\ ,\\ \frac{\partial w}{\partial t}+u\frac{\partial w}{\partial x}+v\frac{\partial w}{\partial y}+w\frac{\partial w}{\partial z}=F_z-\frac{1}{p}\cdot\frac{\partial p}{\partial y}+v\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 w}{\partial z^2}\\ \frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}=0\end{gathered}\qquad(63)$$

или в векторной форме (64):

$$\begin{gathered}\frac{\partial V}{\partial t}+V\cdot\nabla V=F-\frac{1}{p}\mathrm{grad}\rho+v\cdot\nabla^2\cdot V,\\ \mathrm{div}\,V=0\end{gathered}\qquad(64)$$

где $v$ – коэффициент кинематической вязкости среды;

$\rho$ – плотность;

$u$, $v$, $w$ – компоненты вектора скорости по осям координат $x$, $y$ и $z$ соответственно;

$\mathrm{grad}\rho$ – градиент давления.

Уравнения Навье–Стокса, как и любая математическая модель, описывают реальную физическую систему в рамках принятых приближений и допущений.

Для замыкания уравнений, как правило, используется модель турбулентности «$k-\varepsilon$». Достоинством модели «$k-\varepsilon$» является хорошее предсказание свойств турбулентных течений в широких диапазонах турбулентности в сочетании с невысокими затратами расчётных ресурсов ЭВМ. Недостатками данной модели является недостаточная точность при моделировании течений с большой кривизной линий тока, а также плохо предсказываются течения с вращением и завихренностью. Для решения этих проблем были разработаны две модификации модели: «$RNGk-\varepsilon$» и «$Realizablek-\varepsilon$».

В отличие от стандартной «$k-\varepsilon$» модели в «$RNGk-\varepsilon$» присутствуют дополнительные условия в уравнении скорости турбулентной диссипации, что

повышает точность решения высоконапряженных потоков, а также дополнительный параметр, учитывающий циркуляцию турбулентности и повышающий точность вычислений истечений с закруткой потока. Модель «$RNGk - \varepsilon$» представляет собой аналитическую формулу турбулентных чисел Прандтля (в стандартной «$k - \varepsilon$» модели данный параметр является константой) и предоставляет, полученную аналитическим путём, дифференциальную формулу эффективной вязкости, которая работает при качественном сеточном разрешении в области пограничного слоя, что является более приемлемым при расчёте низкорейнольдсовых течений [40].

Эти особенности делают «$RNGk - \varepsilon$» модель более точной и надежной для широкого диапазона турбулентных течений, чем в случае со стандартной «$k - \varepsilon$» моделью.

Модель «$Realizablek - \varepsilon$», которая используется наряду с моделью «$RNGk - \varepsilon$», в отличие от стандартной «$k - \varepsilon$» модели, предсказывает более точно распределение диссипации плоских и круглых струй, а также вращающихся потоков, пограничных слоев, которые подвержены сильным градиентам давления, отрывных течений, развитых вторичных течений.

### 3.3.1 Обоснование выбора конструктивных элементов ГГУ

Разработка относится к инжекционным горелкам для сжигания газообразного топлива в бытовых котлах малой мощности, газовых проточных нагревателях и других аппаратах. С целью определения наиболее оптимальной конструкции газогорелочного устройства разработана модель ГГУ, представленная на рисунке 3.7.

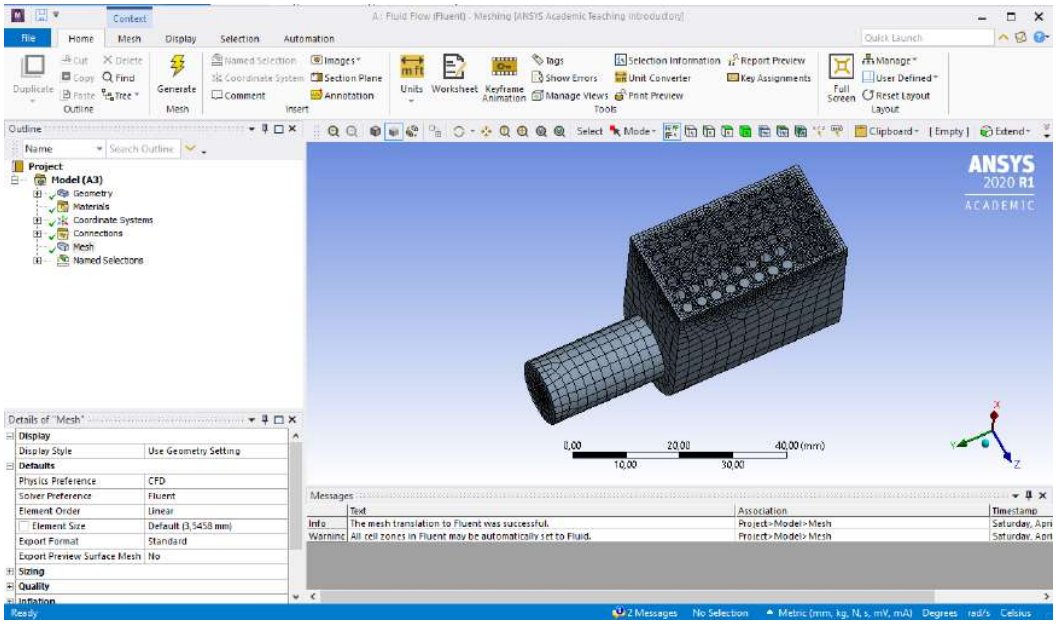


Рисунок 3.7 – Разработанная конструкция инжекционной газовой горелки низкого давления без внешней оболочки

Результатом исследований стало определение эффективного расположения и количества огневых отверстий в газовом коллекторе. Выходное отверстие разработанного диффузора через сегментный отвод, по которому осуществляется поворот газовоздушной смеси, соединяется с газовым коллектором, что обеспечивает равномерное распределение давления у стенки отвода. Были рассмотрены и смоделированы разные способы подачи газовоздушной смеси в топку котла. Наиболее интересными являются следующие модели [41, 128].

При численном моделировании исследовались равномерность распределения поля скорости и давления газовоздушной смеси на выходе из огневых отверстий, показанные на рисунке 3.8 и рисунке 3.9 соответственно.

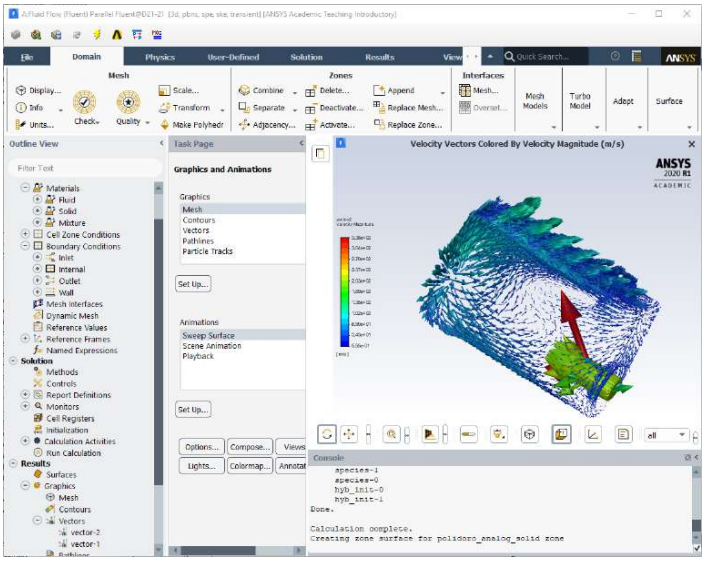


Рисунок 3.8 – Равномерность распределения поля скоростей газовоздушной смеси в ГГУ, разработанной конструкции

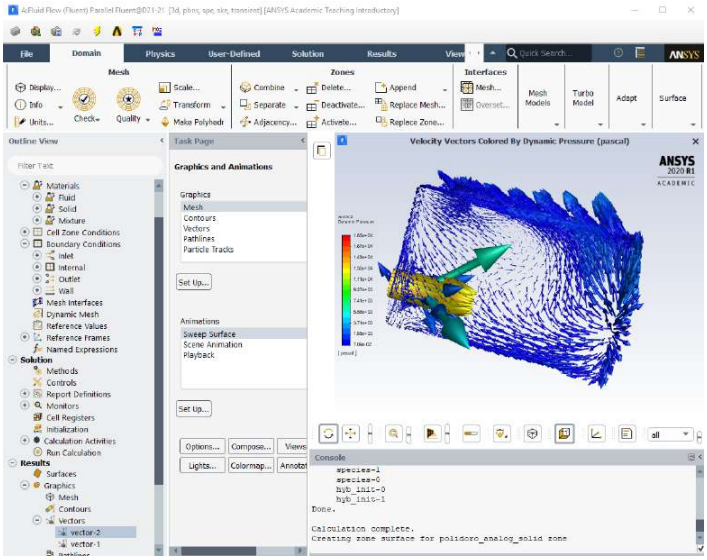


Рисунок 3.9 – Равномерность распределения поля давлений газовоздушной смеси в ГГУ, разработанной конструкции

На рисунке 3.10 представлена разработанная модель ГГУ – горелка зарубежного образца с огневыми каналами круглой.

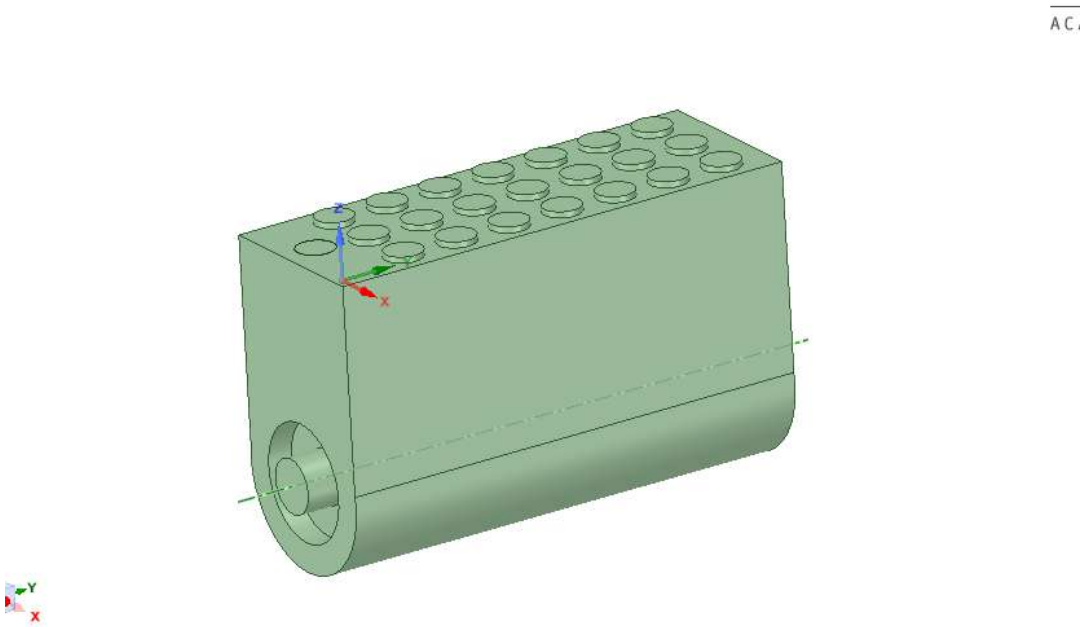

Рисунок 3.10 – Горелка зарубежного образца с огневыми каналами круглой формы «Модель 1»

На рисунке 3.11 представлена разработанная модель ГГУ – горелка с огневым каналом цилиндрического сечения овальной формы.

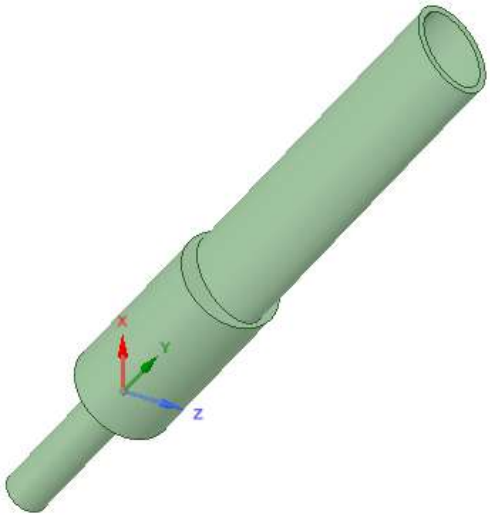

Рисунок 3.11 – Горелка с огневым каналом цилиндрического сечения овальной формы «Модель 2»

На рисунке 3.12 представлена разработанная модель ГГУ – горелка с одним огневым каналом конического сечения.

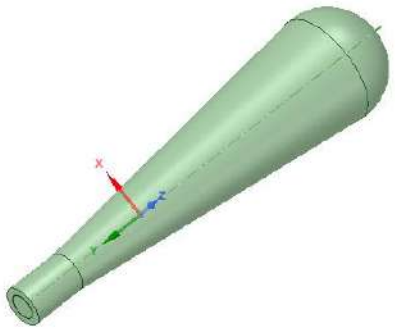

Рисунок 3.12 – Горелка с одним огневым каналом конического сечения «Модель 3»

Для каждой модели были проведены исследования равномерности распределения поля скорости и давления на входе в газогорелочное устройство, по длине газового смесителя, по длине и на повороте диффузора, по длине огневого коллектора, а также на выходе из огневых отверстий согласно рисунку 3.13.

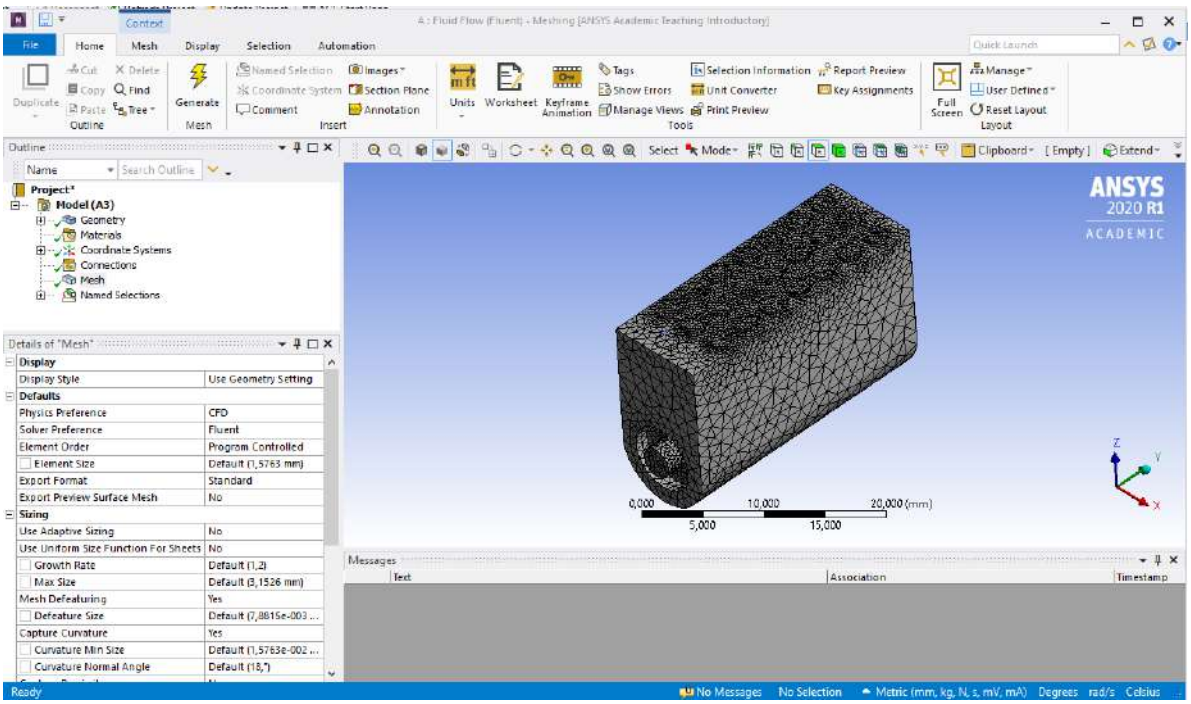


Рисунок 3.13 – Равномерность распределения поля скорости и давления на входе в газогорелочное устройство

Результаты распределения скоростей инжекционной горелки «Модель 1» на выходе из огневых отверстий представлены на рисунке 3.14.

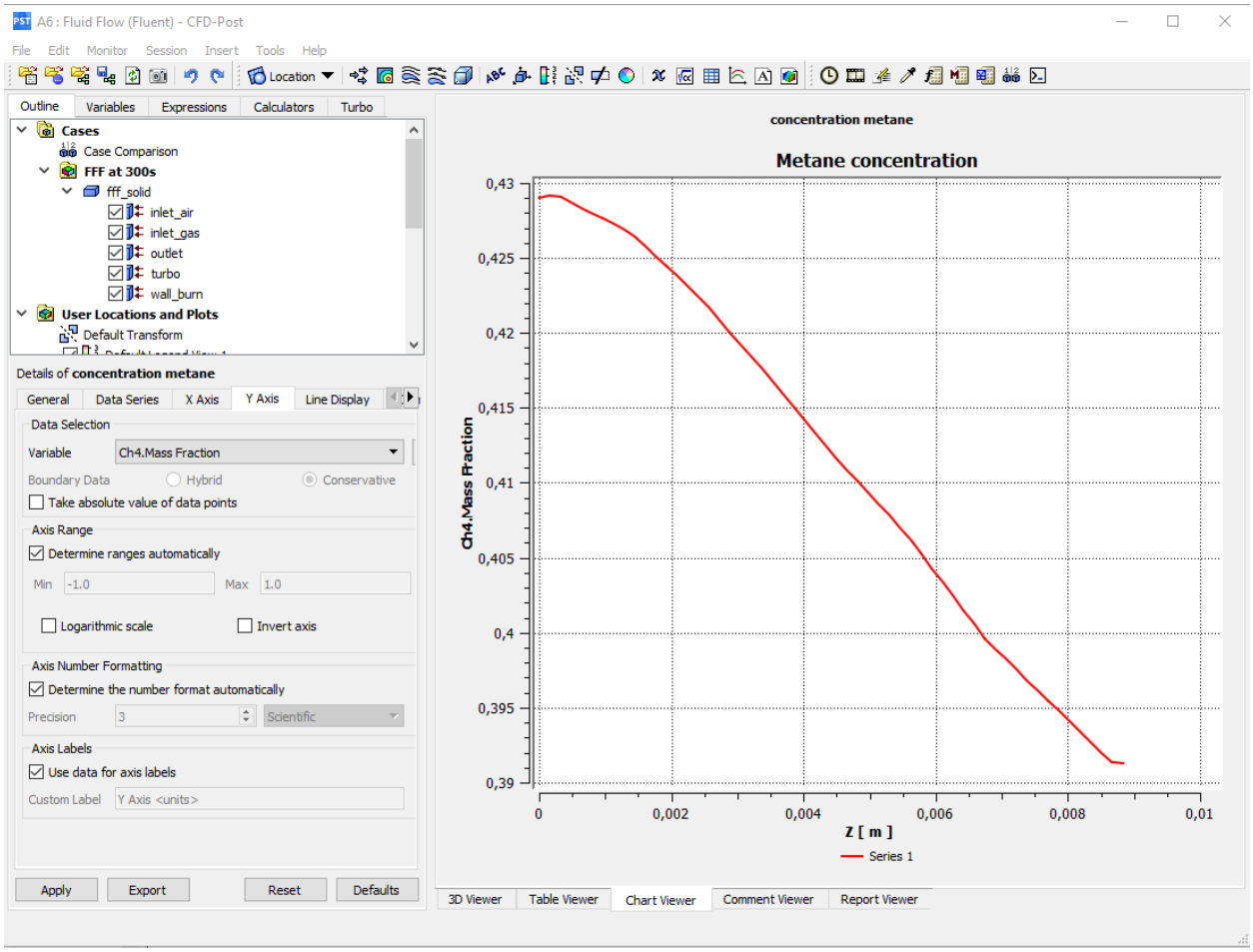


Рисунок 3.14 – График распределения скоростей инжекционной горелки «Модель 1»:
series 1 – распределение скорости выхода концентраций $CH_4$;
series 2 – распределение скорости выхода газовоздушной смеси по центру щелевых отверстий; series 3 – распределение скорости выхода газовоздушной смеси по краю щелевых отверстий

По графику видно, что в инжекционной горелке «Модель 1» скорость выхода неравномерная, неравномерность истечения газовоздушной струи составляет около 58 %. Имеют место явления проскока пламени. Минимальные скорости соответствуют центру коллектора. Для получения равномерной скорости истечения газовоздушной смеси были смоделированы варианты ГГУ «Модель 2» и «Модель 3» промежуточных конструкций изменением сечения газового коллектора и с измененным рядомогневых каналов [42, 43].

Неравномерность распределения скорости выхода в ГГУ «Модель 2» составляет 45 %, что может привести к проскоку пламени, образованию химического недожога и недолговечности работы ГГУ.

Результаты исследований показали необходимость в дальнейших изменениях газового коллектора в местах максимального и минимального значения скорости газовоздушной смеси, чтобы избежать отрыва и проскока пламени, а также для получения более равномерной скорости выхода газовоздушной смеси.

Результаты распределения скоростей инжекционной горелки «Модель 2» на выходе из огневых отверстий представлены на рисунке 3.15.

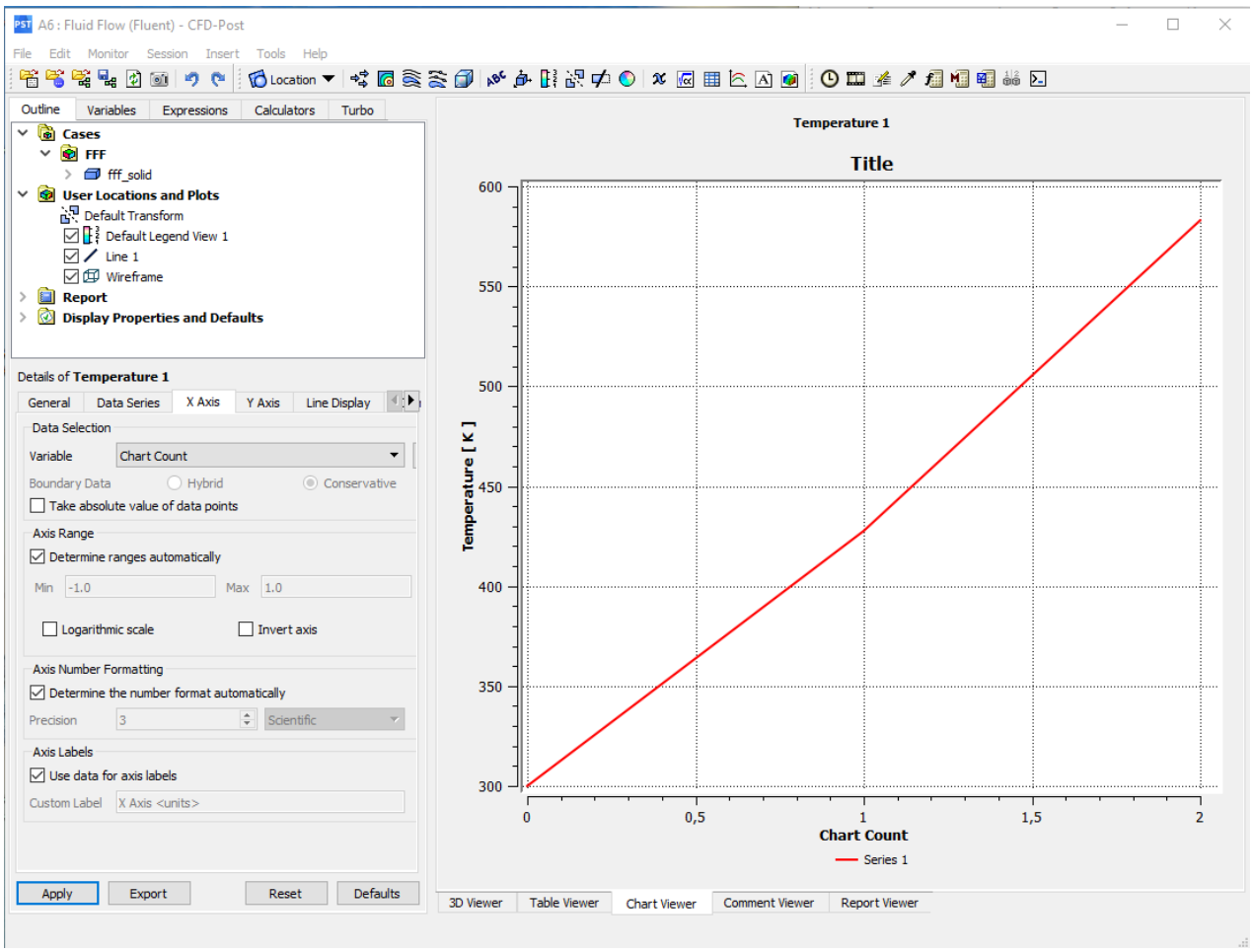


Рисунок 3.15 – График распределения скоростей инжекционной горелки «Модель 2»:
series 1 – распределение скорости выхода концентраций $CH_4$; series 2 – распределение скорости выхода газовоздушной смеси из центральных отверстий круглой формы; series 3 – распределение скорости выхода газовоздушной смеси из крайних отверстий круглой формы

На основании проведенных исследований была выбрана оптимальная конструкция ГГУ, которое позволяет получить равномерное распределение скорости выхода газовоздушной смеси из огневых отверстий.

По графику распределения скорости выхода видно, что равномерное истечение газовоздушной смеси в топку котла происходит из огневого коллектора разработанной конструкции ГГУ [44].

Графически распределение скорости выхода газовоздушной смеси из огневых отверстий, разработанного ГГУ, приведено на рисунке 3.16.

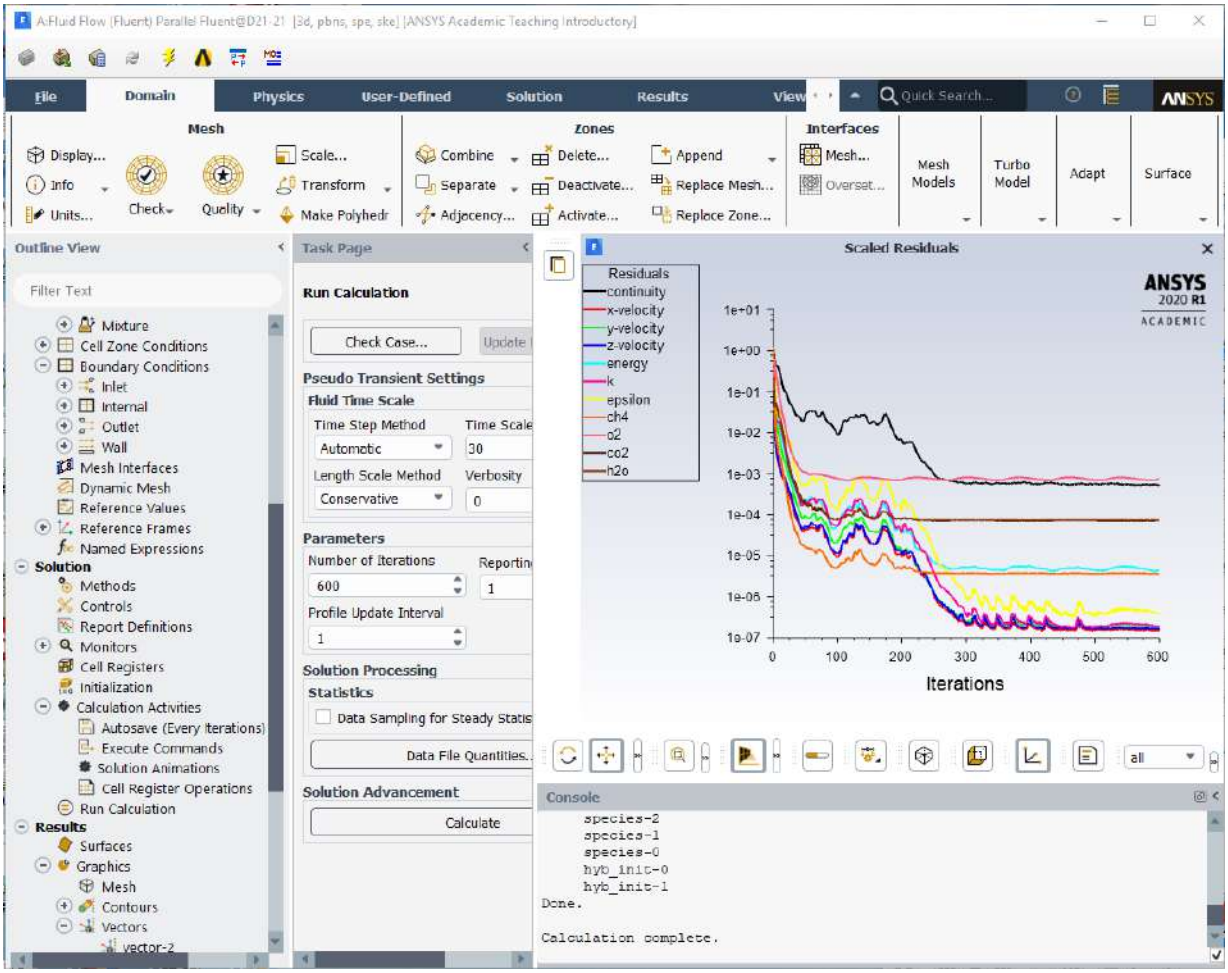


Рисунок 3.16 – Распределения скорости выхода газовоздушной смеси из огневых отверстий в горелке, разработанной конструкции

Для горелки зарубежного образца с огневыми каналами щелевидной формы характерно скачкообразное изменение скорости истечения смеси по длине коллектора, что ухудшает качество сжигания топлива, приводит к химической неполноте сгорания и увеличивает вредные выбросы в атмосферу. Анализ приведенной гистограммы, представленной на рисунке 3.16, показал, что для разработанной инжекционной горелки неравномерность скорости выхода газовоздушной смеси из огневых отверстий, расположенных в крайних рядах составляет 8,9 %, а для огневых отверстий центрального ряда – 11 %. Сравнительная гистограмма показывает, что амплитуда колебаний скорости истечения газовоздушной смеси в горелке разработанной конструкции не превышает 11 %, в то время как, в горелке зарубежного образца этот показатель достигает 58 %. При моделировании работы ГГУ были проведены исследования распределения потока газовоздушной смеси в зависимости от формы огневого канала. Были исследованы огневые коллекторы с цилиндрическими отверстиями,

представленные на рисунке 3.17, и с цилиндрическими отверстиями, имеющими форму усеченного конуса, представленные на рисунке 3.18.

Из графиков видно, что в обоих случаях имеет место зона циркуляции потока. Однако в случае огневых отверстий конической формы поле скорости при выходе газовоздушной смеси более равномерно. Отсутствуют локальные зоны повышенной скорости в коллекторе вблизи острых углов огневых отверстий.

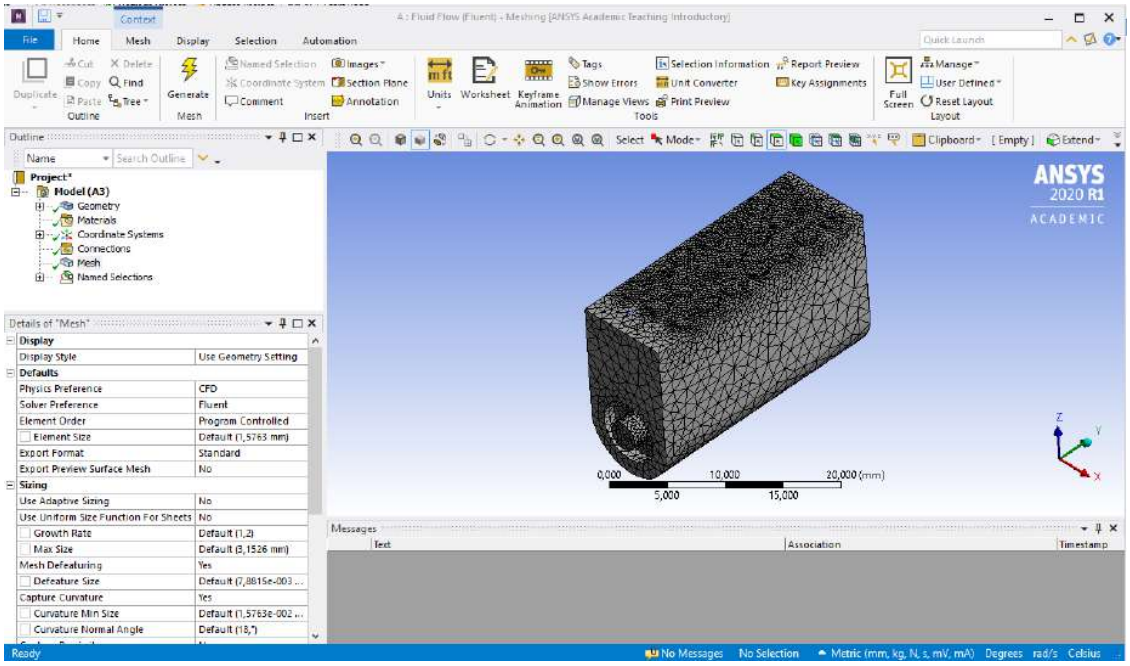


Рисунок 3.17 – Огневой коллектор с цилиндрическими отверстиями

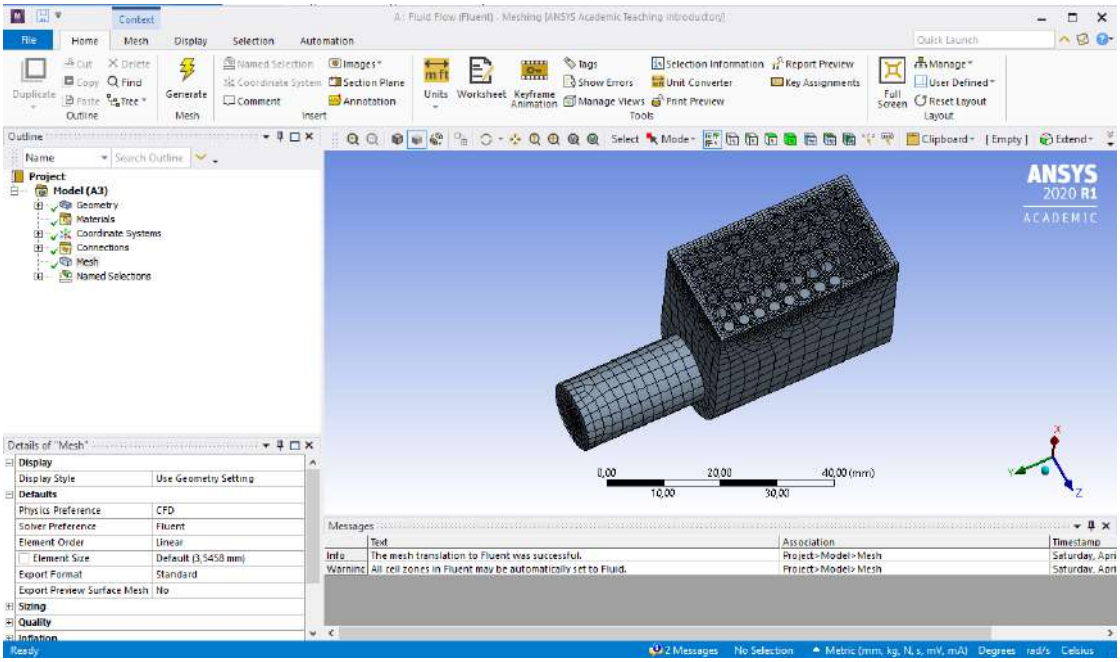


Рисунок 3.18 – Огневой коллектор с цилиндрическими отверстиями в виде усеченного конуса

Наиболее равномерное истечение газовоздушной смеси происходит из ГГУ с огневыми отверстиями в виде усеченного конуса вследствие большего угла выхода газовоздушной смеси. Структура потока газовоздушной смеси, выходящей в топку котла (рисунок 3.18), способствует увеличению подсоса вторичного воздуха на выходе смеси из огневых отверстий. Что, в свою очередь, приводит к более равномерному распределению смеси по объему топки [45, 46].

В процессе исследования методом моделирования были получены также результаты распространения фронта пламени газогорелочного устройства. Исследовались разные модели огневых отверстий ГГУ с разными диаметрами и разным расположением. Модель I, II и III отличаются друг от друга расположением огневых отверстий относительно друг друга, а также их размерами.

«Модель I», показанная на рисунке 3.19, представляет собой инжекционную горелку с огневым коллектором одного диаметра, имеющим три ряда газовыпускных отверстий цилиндрической формы одного диаметра. Фронт пламени не стабильный, низкая скорость выхода из отверстий. Не обеспечивается должный прогрев теплоносителя в теплообменнике.

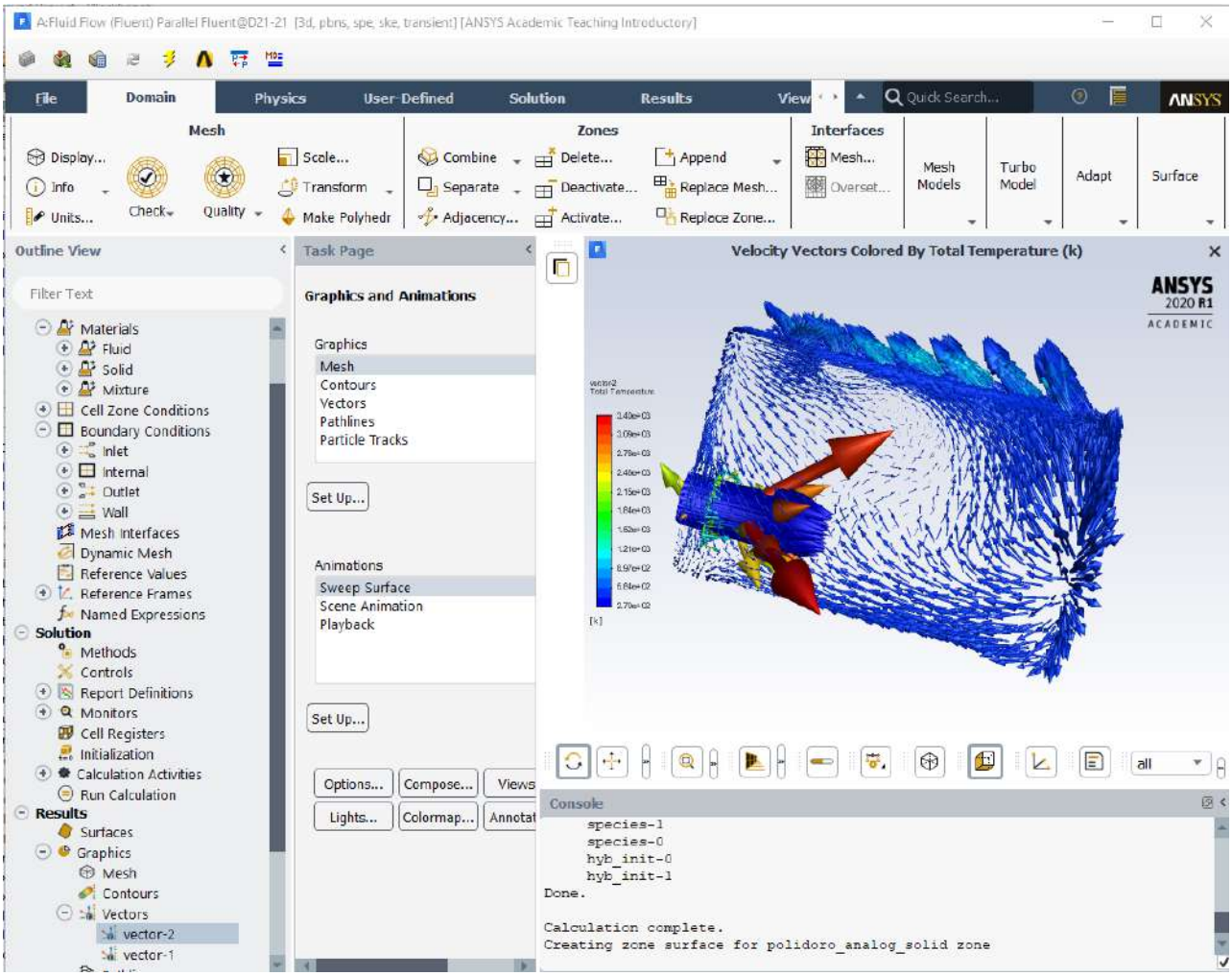


Рисунок 3.19 – Распределение фронта пламени инжекционной горелки «Модель I»

«Модель II», показанная на рисунке 3.20, представляет собой инжекционную горелку с огневым коллектором одного диаметра, имеющим три ряда газовыпускных отверстий цилиндрической формы и разного диаметра. Фронт пламени ярко выраженный и имеет высокую скорость в центральных отверстиях. Равномерность истечения газовоздушной смеси выше, чем в ГГУ «Модель I», но имеется эффект настилания струй боковых отверстий друг на друга, что приводит к смешению потоков и нестабильности горения.

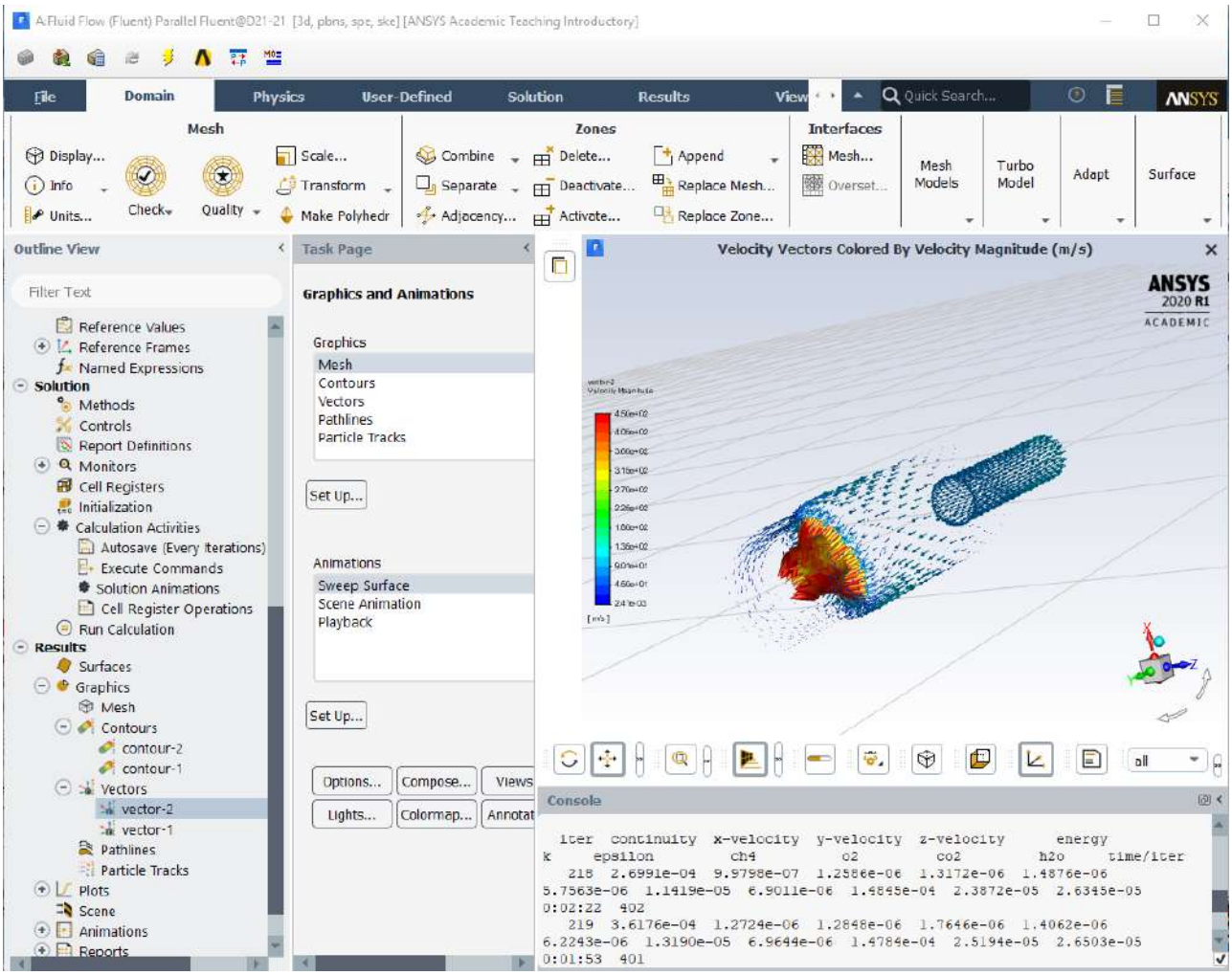


Рисунок 3.20 – Распределение фронта пламени
инжекционной горелки «Модель II»

ГГУ «Модель III», показанная на рисунке 3.21, представляет собой инжекционную горелку с огневым коллектором усеченной формы, имеющим три ряда газовыпускных отверстий цилиндрической формы, расположенных в шахматном порядке, и одного диаметра. Фронт пламени ярко выраженный, имеет высокую скорость в центральных отверстиях. Равномерность истечения газовоздушной смеси из центральных и боковых отверстий не обеспечена. Разработанная модель ГГУ – инжекционная горелка с тремя рядами огневых каналов цилиндрического сечения разного диаметра, которые расположены в

шахматном порядке, представлена на рисунке 3.22. Скорость истечения газовоздушной смеси из центральных и боковых отверстий практически одинакова, что свидетельствует о равномерности истечения газовоздушной смеси в топку котла и равномерности нагрева теплоносителя в теплообменнике [47].

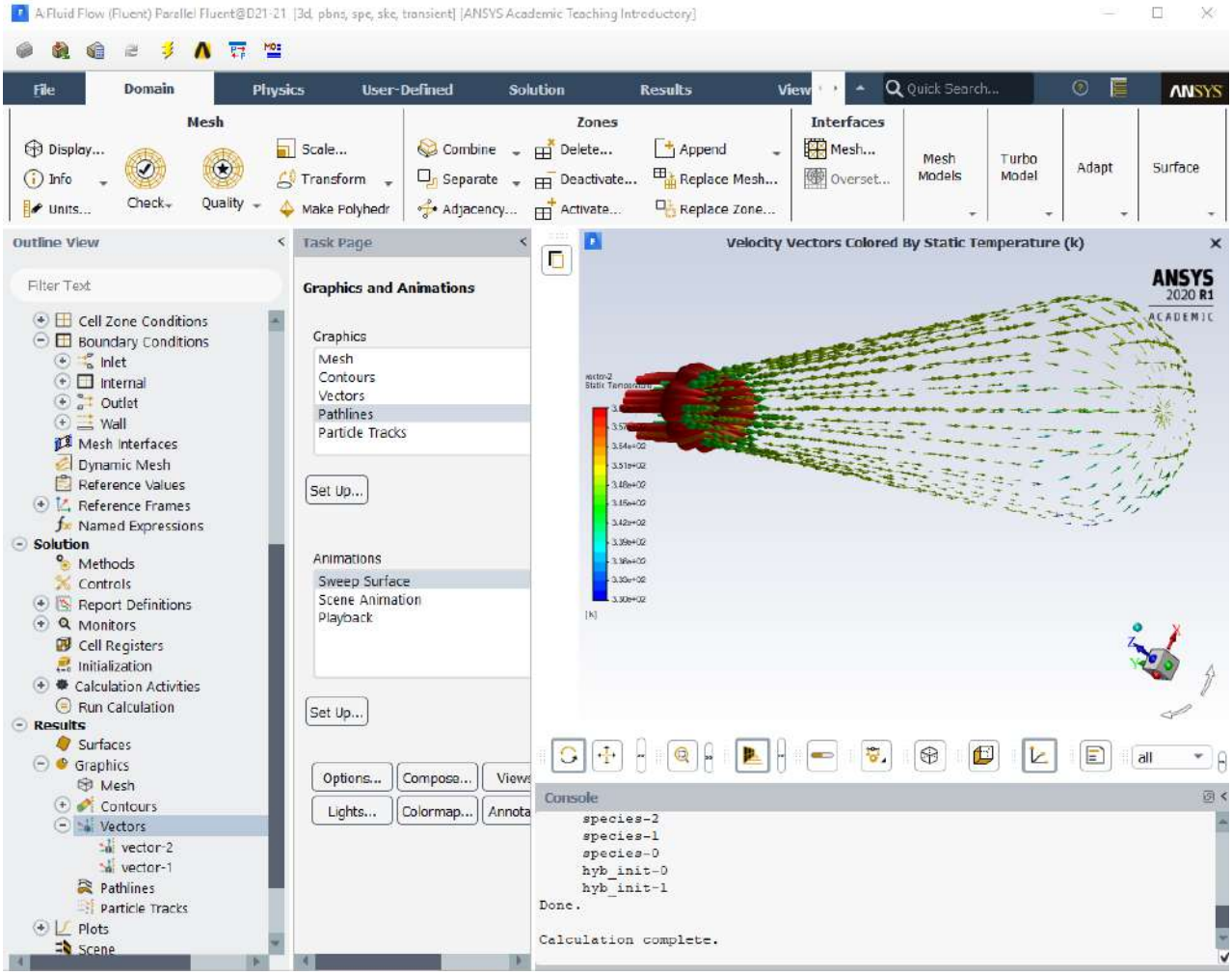


Рисунок 3.21 – Распределение фронта пламени инжекционной горелки «Модель III»

При моделировании оценивалось также взаимодействие струй газовоздушной смеси, выходящих из огневых отверстий разработанной инжекционной горелки. Анализ условий истечения газовоздушной смеси из боковых отверстий (рисунок 3.23), показал, что потоки, истекающие из боковых отверстий, разработанной инжекционной горелки, не смешиваются друг с другом, а движутся параллельно без смешения. Принятое расположение огневых отверстий в разработанной конструкции обеспечит равномерность процесса горения и долговечность работы ГГУ и котлоагрегата.

В результате проведенного математического моделирования было обоснованы конструктивные элементы разработанного ГГУ и показано преимущество разработанной конструкции.

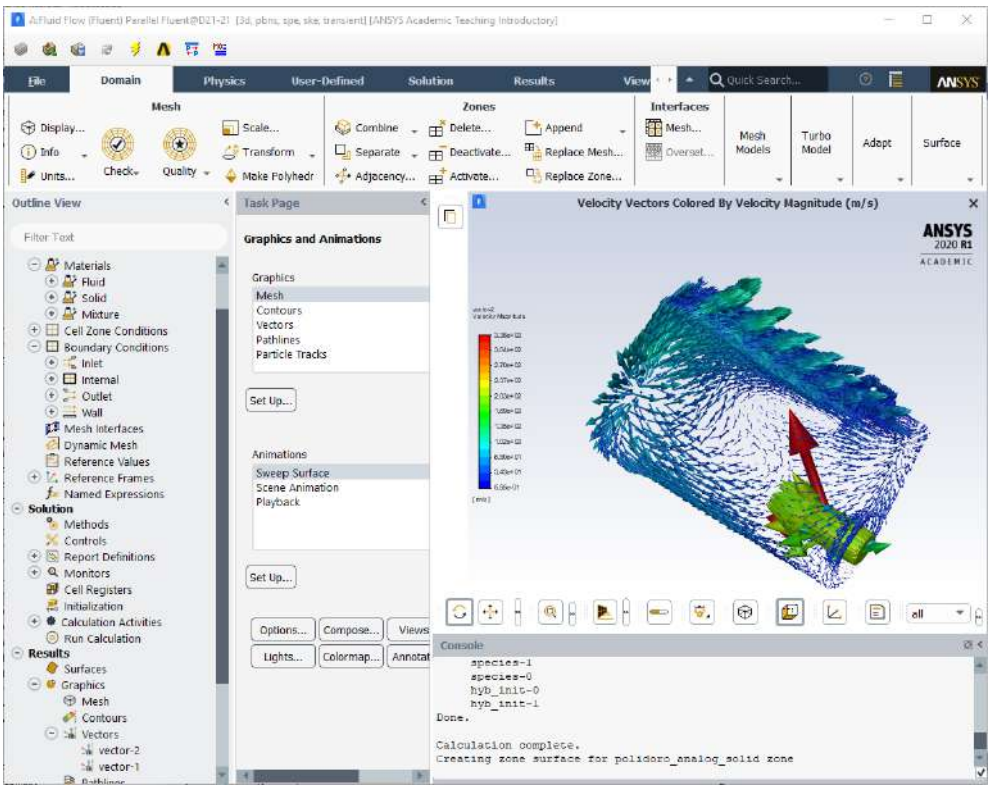


Рисунок 3.22 – Распределение фронта пламени инжекционной горелки разработанной конструкции

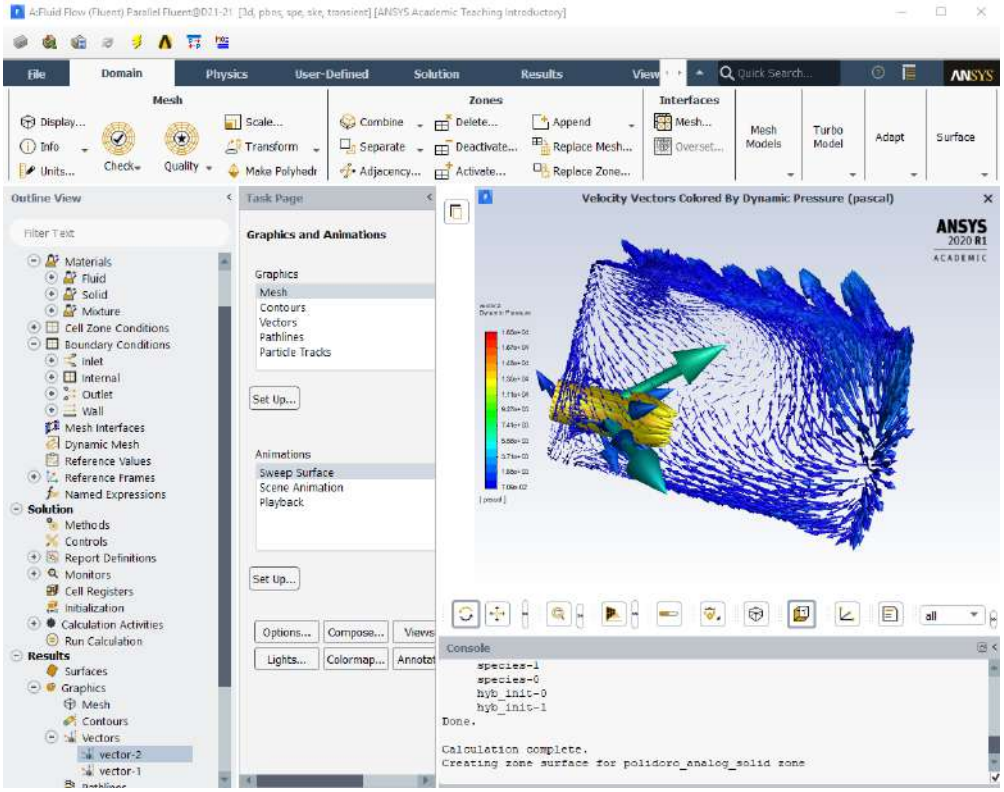


Рисунок 3.23 – Анализ условий истечения газовоздушной смеси из боковых отверстий, разработанной инжекционной горелки

### 3.3.2 Исследование процесса горения в топке котла методом моделирования

В диссертационной работе для обоснования качества сжигания газа в топке бытового газового котла «Protherm KLOM» с разработанным автором ГГУ, представленного на рисунке 3.24.

Рисунок 3.24 – Газовый котел «Protherm KLOM»

Разработана математическая модель горения. Для моделирования многокомпонентного неизотермического течения используются уравнения Навье–Стокса усредненные по Рейнольдсу (*RANS*) и модель турбулентности $k - \omega$ *SST*, которая позволяет оценить (смоделировать) величину турбулентных напряжений в различных условиях [48-51].

В данной модели уравнения движения преобразуются к виду, в котором добавлено влияние флуктуации средней скорости (в виде турбулентной кинетической энергии) и процесса уменьшения этой флуктуации за счёт вязкости (диссипации). Решается два дополнительных уравнения для транспорта кинетической энергии турбулентности и скорости диссипации турбулентности согласно формулам (65) – (72):

$$\frac{\partial}{\partial t}pk + \frac{\partial}{\partial x_i} \cdot pku_i = \frac{\partial}{\partial x_i} \cdot \Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} + G_k - Y_k, \tag{65}$$

$$G_k = -pu'_i u'_j \frac{\partial u_j}{\partial x_i}, \tag{66}$$

$$Y_k = p\beta^* f_\beta k\omega, \tag{67}$$

$$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{Pr_k}, \tag{68}$$

где $G_k$ – генерация турбулентной кинетической энергии за счёт градиентов поля скорости;

$Y_k$ – учёт диссипации турбулентной кинетической энергии;

$\Gamma_k$ – коэффициент турбулентности эффективной диффузии кинетической

$$\frac{\partial}{\partial t}p\omega + \frac{\partial}{\partial x_i} \cdot p\omega u_i = \frac{\partial}{\partial x_i} \cdot \Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} + G_\omega - Y_\omega, \tag{69}$$

$$G_\omega = \alpha \frac{\omega}{k} G_k, \tag{70}$$

$$Y_\omega = p\beta\omega^2, \tag{71}$$

$$\Gamma_\omega = \mu + \frac{\mu_t}{Pr_\omega}, \tag{72}$$

где $G_\omega$ – генерация скорости диссипации турбулентности;

$Y_\omega$ – учёт диссипации скорости диссипации турбулентности;

$\Gamma_\omega$ – коэффициент эффективной диффузии скорости диссипации.

### 3.3.3 Моделирование теплового излучения

Моделирование горения выполнялось в соответствии с концепцией когерентных турбулентных флеймлетов (TFC – Turbulent Flamelet Closure). Моделирование лучистого теплообмена производилось в соответствии с моделью дискретных ординат (DO), наиболее пригодных для моделирования переноса теплового излучения через оптически толстый слой.

Адекватность моделирования горения и тепломассообмена при горении в большой степени определялось расчётом переноса теплового излучения. Модель теплового излучения, прежде всего, должна правильно описывать лучистый теплоперенос внутри пламени и в потоке продуктов сгорания, поскольку от этого зависит строение и динамика пламени, а также интенсивность и полнота процессов сгорания.

Моделирование теплового излучения в процессах горения требует решения двух задач: расчёт процесса переноса теплового излучения и расчёт радиационных свойств среды [52].

Перенос излучения в реальной (непрозрачной) среде определяется собственным излучением, поглощением и рассеянием излучения газами. Излучение, распространяющееся в направлении $s$, ослабляется вследствие поглощения и рассеяния. Одновременно излучение усиливается за счёт собственного излучения и излучения, пришедшего со всех направлений и рассеянного в направлении s. Уравнение переноса излучения имеет вид (73):

$$\frac{\partial I_\lambda(r,s)}{\partial s} = -k_\lambda r + k^s{}_\lambda r \cdot I_\lambda r, s + k_\lambda r\, I_{black,\lambda}\, r + \\ + \frac{1}{4\pi} k^s{}_\lambda(r) \,{}_{\alpha=0}^{4\pi}\, I_\lambda(r,s') Y_\lambda(r,s,s') \partial\alpha, \qquad (73)$$

где $I_\lambda$ – спектральная интенсивность излучения;

$I_{black,\lambda}$ – спектральная интенсивность излучения абсолютно чёрного тела;

$k_\lambda$ и $k^s{}_\lambda$ – спектральные коэффициенты поглощения и рассеяния соответственно;

$Y_\lambda(r,s,s')$ – индикатриса рассеяния из направления $s'$ в направлении $s$.

Интенсивность излучения определяет все характеристики лучистого теплообмена, в частности плотность энергии излучения и лучистый тепловой поток. Все характеристики зависят от следующих шести переменных: три пространственные координаты радиус–вектора $r$, два угла, определяющих направление $s$ и $s'$, и длина волны излучения $\lambda$.

В диссертационной работе моделирование теплового излучения производилось по методу «DO» – дискретных ординат. В основе этого метода лежит численное решение системы дифференциальных уравнений переноса излучения записанной для каждого элемента объёма расчётной сетки, во всех направлениях. При расчетах

в работе весь телесный угол был разбит на 16 сегментов (направлений). Также для ускорения расчёта были использованы следующие допущения:

– не учитывалось рассеяние теплового излучения;

– вместо спектральных интенсивностей рассматривались интегральные величины по формулам (74) и (75):

$$I = {}_{0}^{\infty} I_{\lambda} \cdot \partial \cdot \lambda, \tag{74}$$

$$I_b = {}_{0}^{\infty} I_{black,\lambda} \cdot \partial \cdot \lambda = \frac{\sigma T^4}{\pi}, \tag{75}$$

– вместо спектрального коэффициента поглощения вводилось эффективное значение, осреднённое по спектру. При этом для приближённого учёта спектрального состава излучения использовался один эффективный коэффициент поглощения для среды в целом («серое» приближение).

### 3.3.4 Моделирование горения

Расчёт газового состава и динамики горения в расчётной области определялся в соответствие по заранее табулированным зависимостям, определённым из подробной химической кинетики реакции (GRI–Mech 3.0). Расчёт переноса компонентов производился через решение уравнения всего для одной искусственной переменной: смесевой доли (mixture fraction «χ», уравнение 76). Возможность описания переноса всех компонентов смеси посредством одной переменной объясняется законом сохранения массы на атомарном уровне (в ходе любых реакций в замкнутой системе число атомов в смеси остаётся постоянным). Распространение фронта пламени решается посредством другой искусственной переменной: прогрессной переменной (progress variebles «*c*», уравнение (77):

$$\frac{\partial pX}{\partial t} + \frac{\partial pu_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \Gamma_X \frac{\partial X}{\partial x_j}, \tag{76}$$

$$\frac{\partial pc}{\partial t} + \frac{\partial pu_j c}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \Gamma_{Xc} \frac{\partial c}{\partial x_j} + \omega, \tag{77}$$

где $\omega$ находится по формуле (78):

$$\omega = A \cdot p_u \cdot S_t \cdot \nabla c, \tag{78}$$

где $A$ – модельная константа;

$p_u$ – плотность несгоревшей смеси;

$S_t$ – скорость турбулентного пламени, вычисленного по модели Зимонта.

Для расчета смоделирована неструктурированная многогранная расчётная сетка в 10 млн элементов, представленная на рисунке 3.25.

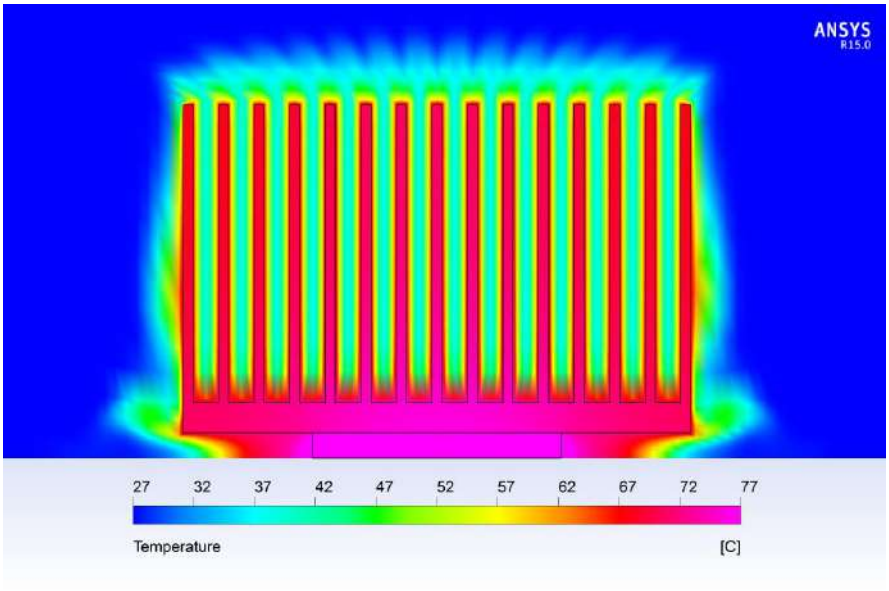


Рисунок 3.25 – Многогранная расчетная сетка топки котла
и разработанной горелки

Использование многогранной сетки оправдано тем, что конструкция горелочных устройств имеет криволинейную форму, показанную на рисунке 3.26.

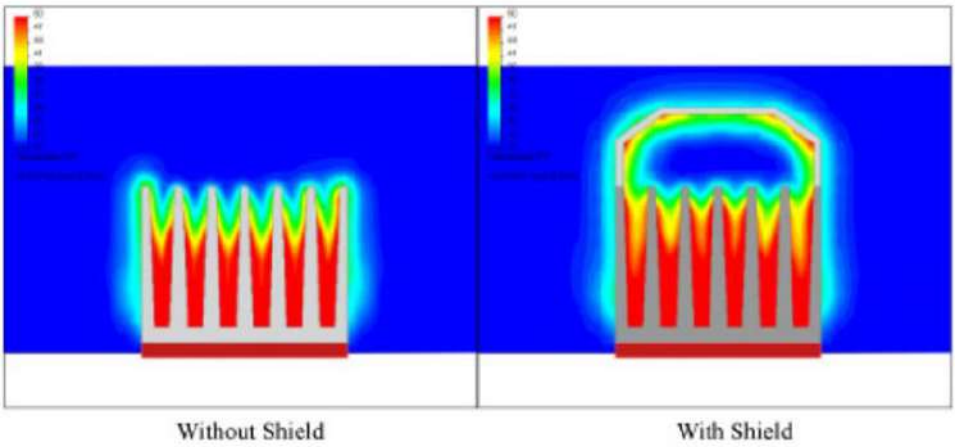


Рисунок 3.26 – Модель топки котла и разработанной горелки

Минимальный линейный размер элемента составляет 0,15 мм (газовое сопло), максимальный 12 мм. На рисунке 3.27 показано, что сгущение сетки произведено в областях выхода топлива в расчётное пространство для более детального моделирования турбулентной струи и в местах отверстий горелочного устройства для более детального моделирования пламени и теплового факела [52].

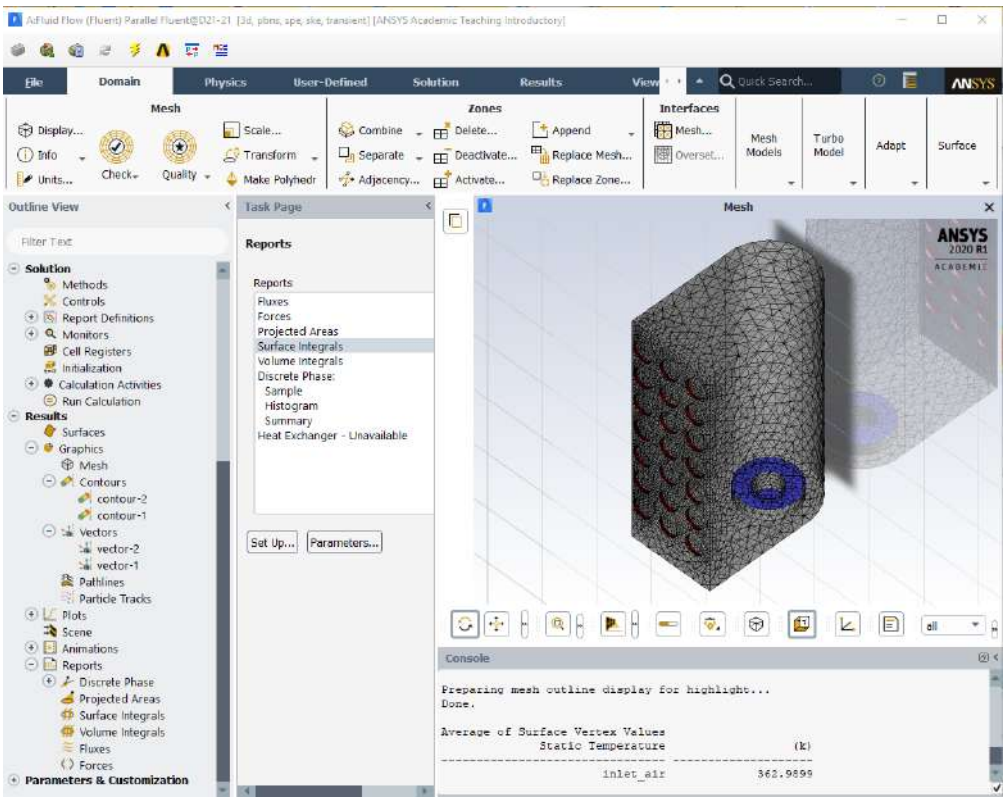


Рисунок 3.27 – Расчётная сетка в области горелки

Параллельно с этим были сгенерированы расчетные таблицы тепловыделений и массовых долей интересующих компонентов смеси от двух переменных (смесевой доли и прогрессной переменной). Сгенерированные таблицы были рассчитаны программой «STAR–CCM+». Далее были заданы фиксированные значения смесевой доли и прогрессной переменной. На входе газовых сопел они равны 1 и 0 соответственно. По табличным значениям означает абсолютно чистый газ и сгоревший. На границах подсоса воздуха эти значения также фиксированы и равны. Так как рассматривается чистый не сгоревший воздух. На выходе из топки и на твердых стенках был задан нулевой градиент этих величин. В процессе расчета получилось, что на выходе из топки по всей площади распределения прогрессная переменная равна 1, это значит, что все потоки газа прореагировали.

На разработанной модели был произведен расчёт процесса горения при разных мощностях. Это связано с тем, что современное газогорелочное оборудование должно иметь плавное регулирование мощностных параметров.

Температурные поля, полученные в результате расчета процесса горения в топке котла при разной мощности, приведены на рисунках 3.28 и 3.29. При расчете определялись также равномерность горения, полнота сгорания и концентрация продуктов сгорания.

Анализ распределения полей температуры по длине ГГУ показал равномерность распределения факелов горения, что характеризует устойчивый процесс горения. Что в совокупности с расчётом равномерности распределения газовоздушной смеси подтверждает качественную работу разработанной горелки.

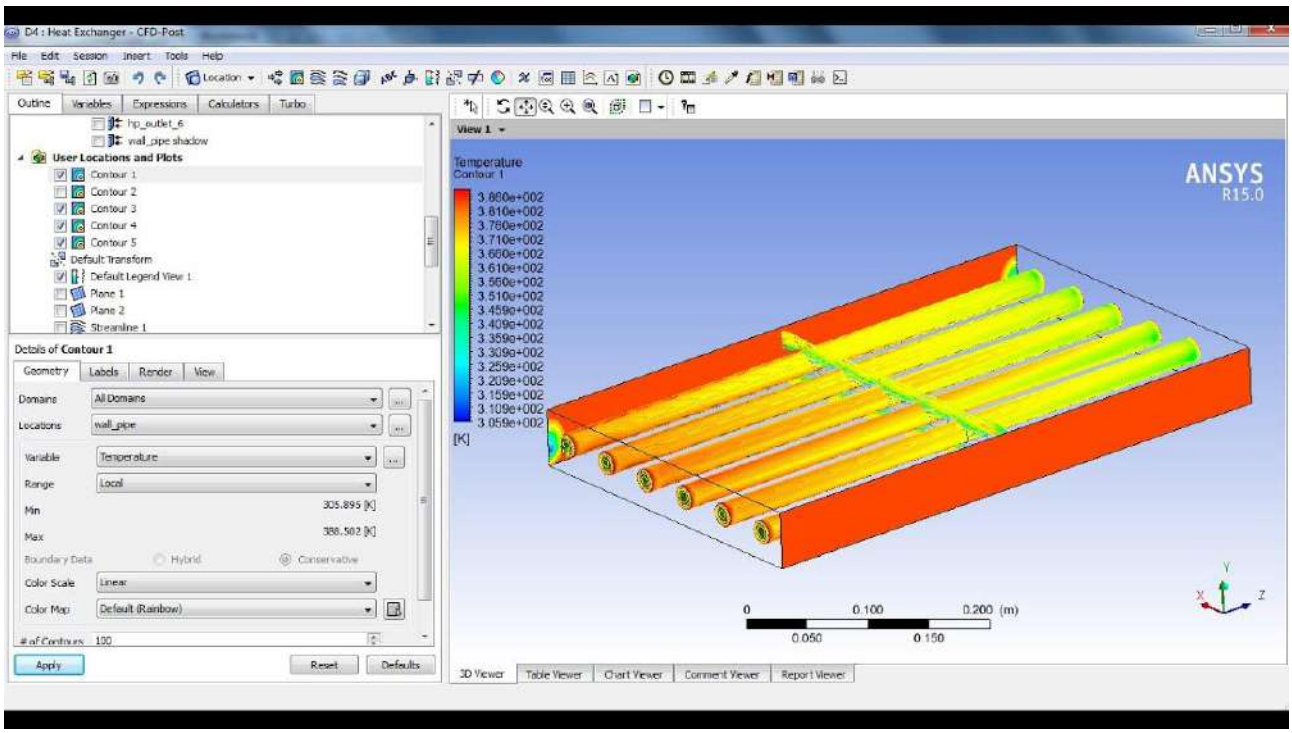


Рисунок 3.28 – Распределение поля температур при работе котла на 25 кВт

Исследование параметров температурного поля, приведенного в аксонометрии на рисунке 3.29, позволяет сделать вывод о равномерности прогрева теплоносителя в теплообменнике и внутренних стен топки [53, 54].

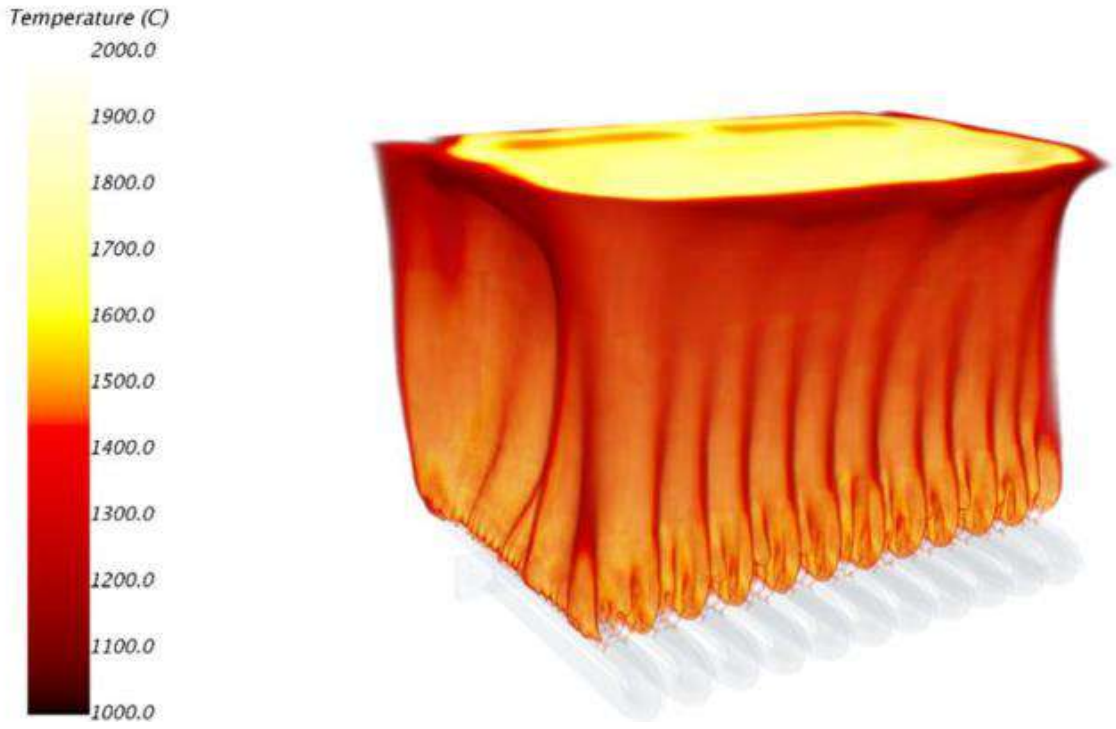


Рисунок 3.29 – Аксонометрия температурного поля процесса горения

Качества сжигания газа при разной тепловой нагрузке подтверждается исследованиями, результаты которых показаны на рисунке 3.30 и в таблице 3.1. Содержание вредных веществ соответствует нормам предельно–допустимых концентраций (далее по тексту ПДК).

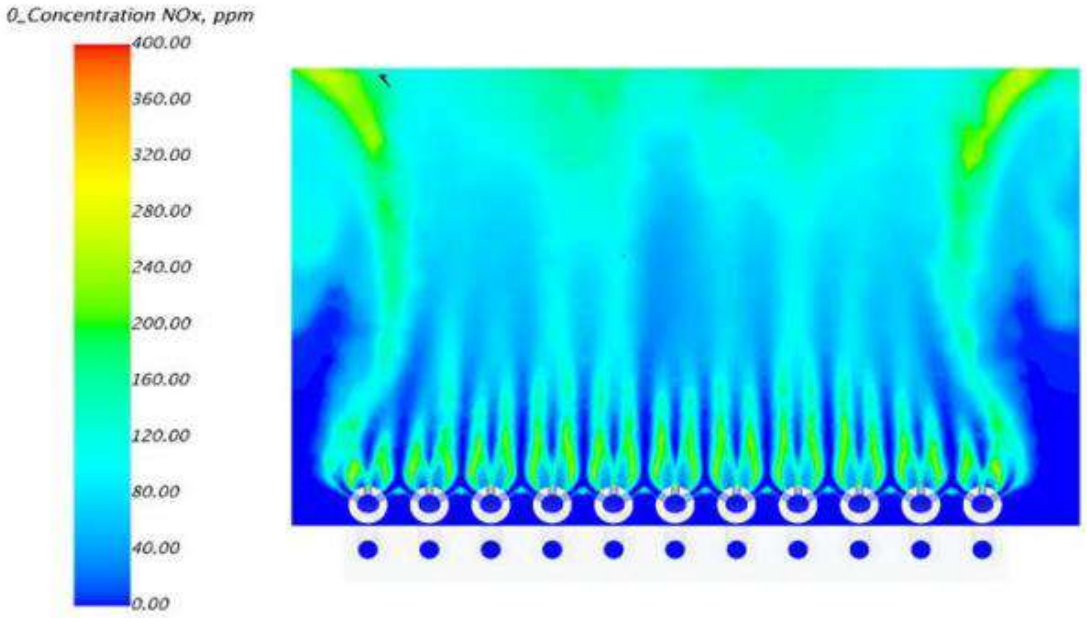


Рисунок 3.30 – Концентрации $NO_x$ в топке котла

Таблица 3.1 – Концентрации $NO_x$ топке котла

| Мощность котла, кВт | $NO_x$, ppm | $NO_x$, мг/м$^3$ |
|---|---|---|
| 15 | 189,5 | 236,4 |
| 20 | 173,6 | 216,7 |
| 25 | 155,9 | 194,6 |
| 30 | 133,0 | 166,1 |

По результатам расчета получена эмпирическая зависимость концентрации $NO_x$ топке котла от тепловой мощности топки (коэффициент детерминации 0,9997), которая имеет вид (79):

$$NO_x = 0{,}888Q^2 + 0{,}7Q + 266{,}5, \quad (79)$$

где $NO_x$ – концентрация, мг/м$^3$;

$Q$ – тепловая нагрузка, кВт.

Так как на зону устойчивого горения и на качество сжигания газа влияет величина коэффициента избытка воздуха. Были проведены исследования процессов горения на максимальную мощность котла (30 кВт) при разных

значениях коэффициента избытка воздуха $\alpha$ с выбором наиболее оптимальных значений. Результаты расчетов приведены на рисунках 3.31 – 3.34.

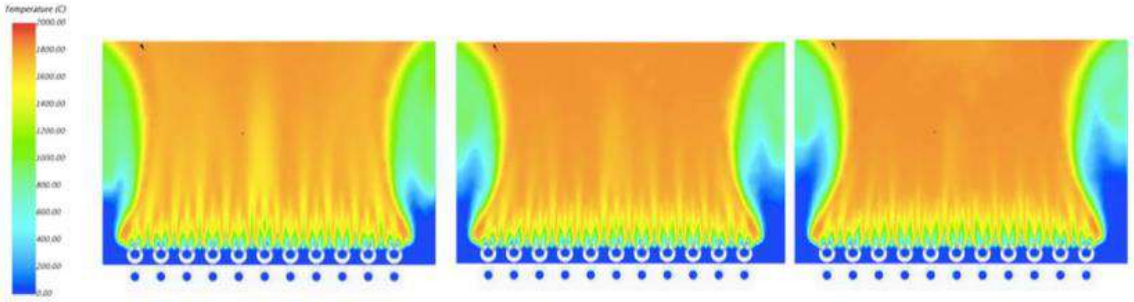

Рисунок 3.31 – Распределение температурного поля при $\alpha$ = 1,0/$\alpha$ = 1,1/$\alpha$ = 1,2

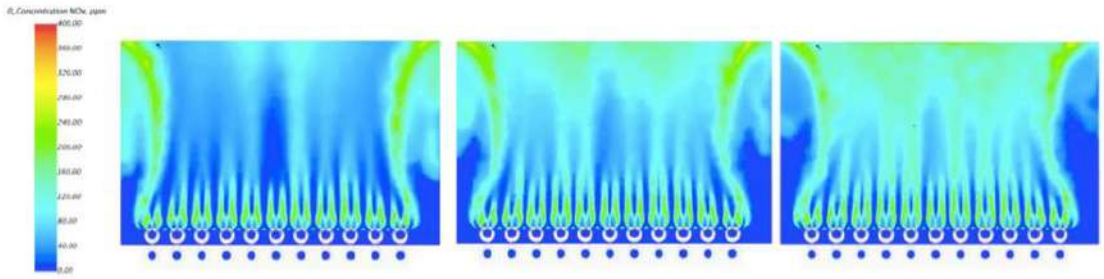

Рисунок 3.32 – Распределение концентраций $NO_x$ при $\alpha$ = 1,0/$\alpha$ = 1,1/$\alpha$ = 1,2

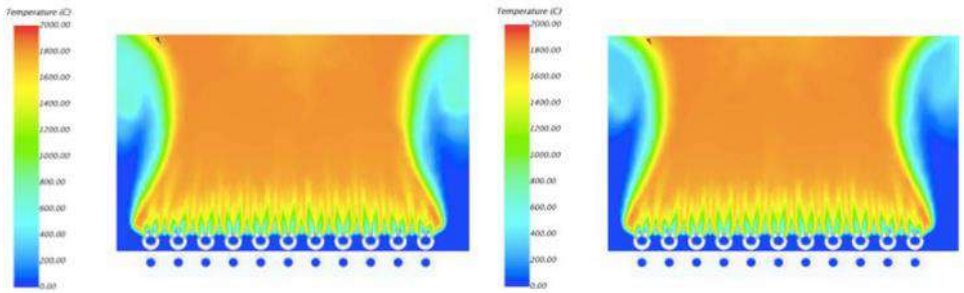

Рисунок 3.33 – Распределение температурного поля при $\alpha$ = 1,3/$\alpha$ = 1,4

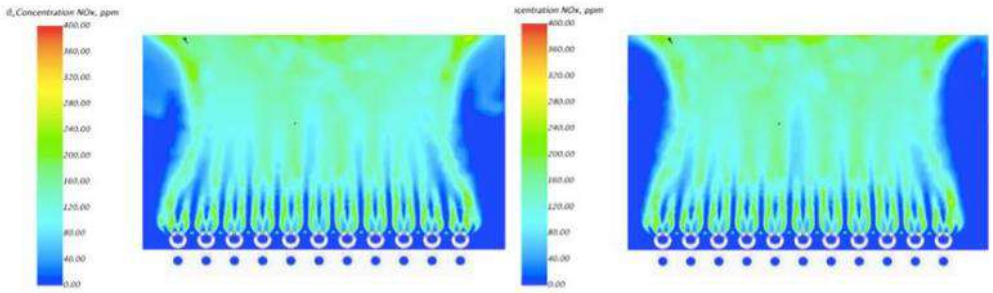

Рисунок 3.34 – Распределение концентраций $NO_x$ при $\alpha$ = 1,3/$\alpha$ = 1,4

На основании полученных результатов построен график на рисунке 3.35 зависимости концентраций окислов азота от коэффициента избытка воздуха [55].

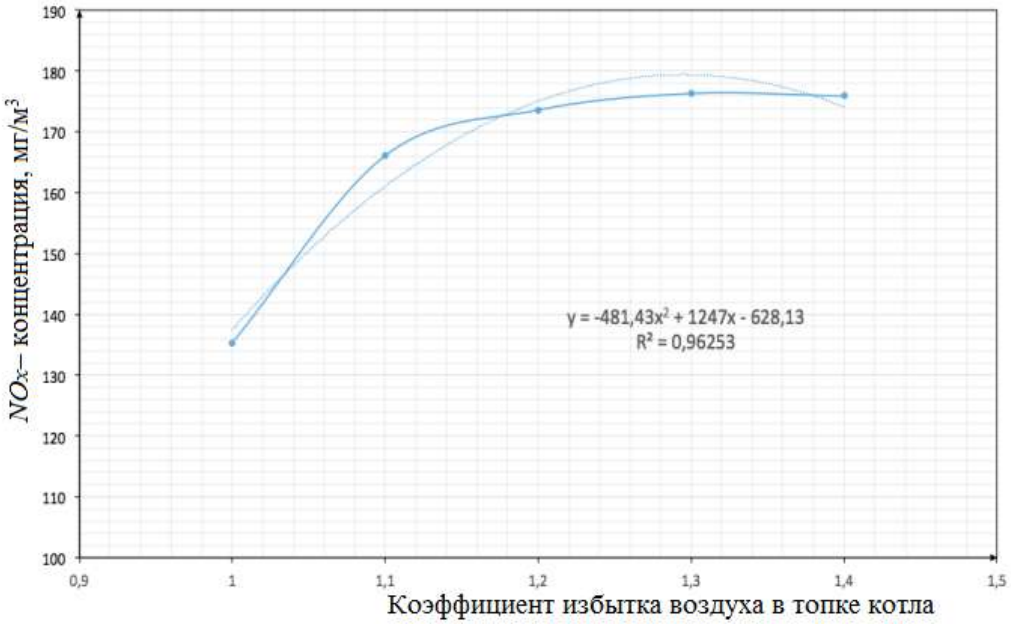


Рисунок 3.35 – Графическая зависимость концентраций $NO_x$ в топке котла от коэффициента $\alpha$

Полученные значения концентраций $NO_x$ не превышают допустимых величин ПДК согласно таблицы 3.2.

Таблица 3.2 – Концентрации $NO_x$ в топке котла

| Коэффициент избытка воздуха | $NO_x$, ppm | $NO_x$, мг/м$^3$ | $NO_x$, мг/с |
|---|---|---|---|
| $\alpha$ = 1,0 | 108,3 | 135,2 | 7,296 |
| $\alpha$ = 1,1 | 133,0 | 166,1 | 9,729 |
| $\alpha$ = 1,2 | 139,1 | 173,6 | 10,918 |
| $\alpha$ = 1,3 | 141,2 | 176,3 | 11,925 |
| $\alpha$ = 1,4 | 140,1 | 175,9 | 12,811 |

По результатам расчета получена эмпирическая зависимость концентрации т $NO_x$ топке котла от коэффициента избытка воздуха (коэффициент детерминации 0,963), которая имеет вид (80):

$$NOx = -481{,}43\alpha^2 + 1247\alpha - 628{,}13, \quad (80)$$

где $NO_x$ – концентрация топке котла, мг/м$^3$;

$\alpha$ – коэффициент избытка воздуха в топке котла.

Влияние мощности котлоагрегата на содержание $NO_x$ в уходящих газах при полном коэффициенте избытка воздуха $\alpha$ = 1,1 по результатам расчета приведено на рисунке 3.36. Расчёт показал, что в диапазоне значений коэффициента избытка воздуха α от 1,1 до 1,4 отсутствует химический недожог, и количество вредных выбросов $NO_x$ не превышает ПДК как в топке котла, так и в уходящих газах [57].

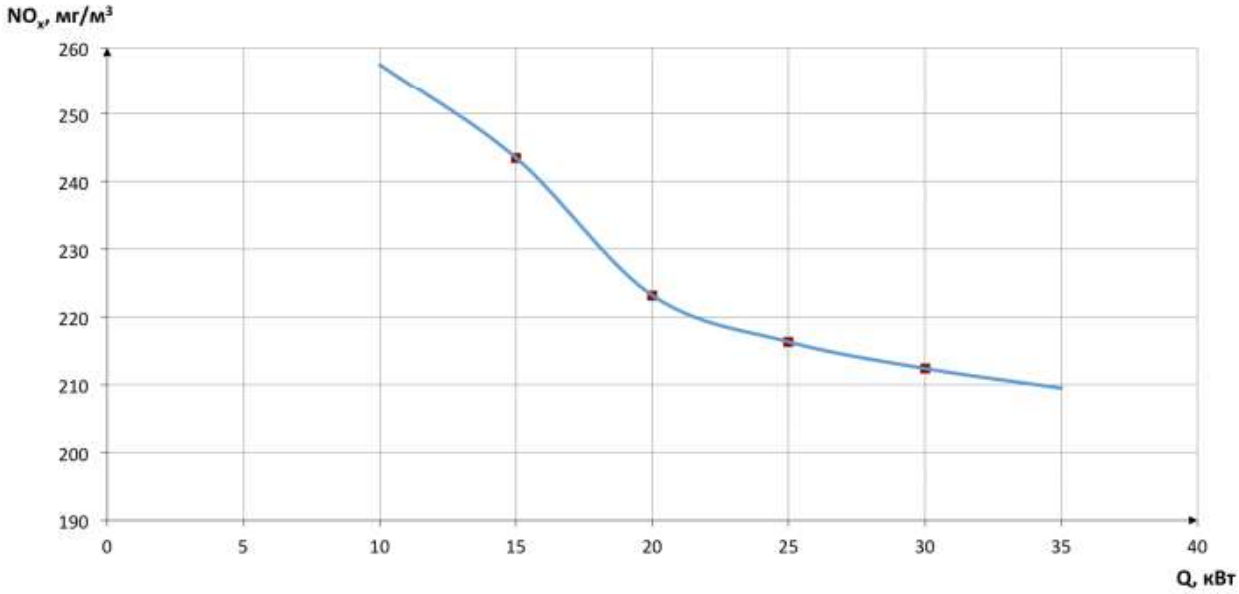


Рисунок 3.36 – Зависимость концентраций $NO_x$ в уходящих газах от мощности котлоагрегата при полном коэффициенте избытка воздуха $\alpha$ = 1,1

# 4 ПОЛУЧЕНИЕ И СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И РЕЗУЛЬТАТОВ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

## 4.1 Анализ результатов компьютерного моделирование и результатов горения на физических моделях

Экспериментальные исследования работы котла «Protherm KLOM» с тепловой мощностью 30 кВт с разработанным ГГУ, входящего в состав котельной установки, проводились на действующем теплогенерирующем оборудовании в котельной, расположенной в Челябинской области, города Миасса на промышленной территории ООО «АстанГаз» [58, 59].

При проведении исследований определялись после установки разработанного газогорелочного устройства, указанного в работе под №1 в третьей главе работы:

– энерго–экологические показатели работы газового отопительного котла при отсутствии химического недожога;

– тепловой баланс отопительного котла;

– величина потерь теплоты котла в окружающую среду.

## 4.2 Методика исследований энерго–экологических показателей работы каскадной котельной при отсутствии химического недожога

Котел «Protherm KLOM» с тепловой мощностью 30 кВт имеет поверхность нагрева 6,03 м², секции – фронтальная, две боковых, верхняя и нижняя.

Разработанное газогорелочное устройство инжекционного типа, установленное в котлах «Protherm KLOM», работает на газе низкого давления. Подробное описание разработанного газогорелочного устройства приводится в третьей главе диссертации.

Методика исследований энерго–экологических показателей работы при отсутствии химического недожога разработана в соответствии с нормативными документами [65, 66, 67, 80, 81].

Газоснабжение котельной с котлом указанного образца осуществляется от газопровода среднего давления и газораспределительную сеть-установку (ГРУ) «ГРУ–10,5», которая оснащена техническим узлом учёта и снижения давления природного газа до значений 2 000 Па.

Все исследования проводились на установившихся тепловых режимах работы котельной установки в соответствии с программой инструментальных измерений, которая была согласованна с газораспределяющей организацией.

Целью экспериментальных исследований было определение концентрации вредных веществ, которые образуются при сгорании природного газа в зависимости от тепловой нагрузки, а именно угарного газа $CO$ и окислов азота $NO_x$.

Измерения выполнялись на восьми тепловых режимах. На каждом режиме проводилась серия из 10 измерений для оценки статистической погрешности.

В ходе испытаний регулировались расход газа, $B_г$, м³/ч и давление газа перед горелкой, $P_г$, Па.

Температура газа, $t_г$, ºС и температура воздуха, $t_в$, ºС, а также низшая теплота сгорания топлива, $Q_н^р$, кДж/м³ при испытаниях оставались постоянными [60-62].

Определение расхода природного газа на котел «Protherm KLOM» с тепловой мощностью 30 кВт осуществлялась по показаниям ультразвукового портативного расходомера марки «Взлет ПР» (заводской номер 301 064), который был установлен на подающей линии трубопровода, с учетом давления газа, его плотности и фактической температуры.

Для определения давления природного газа перед горелкой на котле «Protherm KLOM» с тепловой мощностью 30 кВт использовался манометр марки «Д60», цена деления 0,1, погрешность измерений 0,6 %.

Для измерения температуры питательной воды до и после котла «Protherm KLOM» использовались термометры, установленные в точках измерения на оборудовании и трубопроводе. Предел измерения термометра биметаллического 120 ºС, цена деления 1 ºС.

Для анализа содержания продуктов сгорания использовался автоматический цифровой газоанализатор «TESTO–300», который зарегистрирован в Государственном реестре средств измерений № 46839, показанный на рисунке 4.1.

Рисунок 4.1 – Газоанализатор «TESTO–300»:
1 – блок–анализатор; 2 – сенсорный дисплей; 3 – ПО с базой данных; 4 – интерфейс; 5 – гнездо подключения зондов контроля качества воздуха в помещении; 6 – гнездо для зондов определения концентрации окислов азота *NOx*, угарного газа *CO*, диоксидов серы $SO_2$ и кислорода $O_2$; 7 – встроенный сенсор измеренфференциального давления, настройка таймера/часов для $\Delta P$; 8 – разъем подключения к сети, 9 – клавиатура управления; 10 – встроенный принтер

Газоанализатор «TESTO–300» состоит из блока–анализатора, сенсорного экрана, комплекта подключаемых пробоотборных зондов, фильтров тонкой очистки, интерфейса, встроенного принтера, блока питания для работы от сети 220 В, зарядного устройства для аккумуляторов (рисунок 4.1).

Схема проведения измерений на водогрейном котле «Protherm KLOM» с инжекционной многофакельной горелкой разработанной конструкции представлена на рисунке 4.2.

Рисунок 4.2 – Схема проведения измерений на водогрейном котле «Protherm KLOM» с инжекционной многофакельной горелкой разработанной конструкции

Приведение концентраций компонентов окислов азота и оксида углерода $CO_{пр}$ к $\alpha$=1, определялось по формулам (81) и (82):

$$CO_{\text{пр}} = CO \cdot \alpha, \tag{81}$$

$$NO_{X\text{пр}} = NO \cdot \alpha. \tag{82}$$

Измерение давления на водогрейном котле «Protherm KLOM» с инжекционной многофакельной горелкой разработанной конструкции по согласованной инструкции представлено на рисунке 4.3.

Рисунок 4.3 – Измерение давления на водогрейном котле «Protherm KLOM» с инжекционной многофакельной горелкой

Температура уходящих газов в точках тракта была измерена термопарой типа «K(Ni–CrNi)», которая входит в состав пробного зонда газоанализатора [68-70].

Разряжения в топке котла и по газовому тракту котельной установки осуществлялось с помощью газоанализатора «TESTO–300», в состав которого входит прессостат.

Приведенные ниже параметры рассчитываются по результатам экспериментальных исследований по формулам, приведенным в [65, 66, 67, 73,129].

Потери теплоты от химической неполноты сгорания топлива, вычисляются по формуле (83):

$$q_3 = V_{\text{С.Г}} \cdot CO \cdot \frac{Q_{CO}}{Q_{\text{н}}^{p}}, \qquad (83)$$

где $V_{\text{С.Г}}$ – объем сухих продуктов сгорания, м³/м³;

$CO$ – объемная концентрация оксида углерода, приведенная к $\alpha$=1, в процентах;

$Q_{CO}$, $Q_{\text{н}}^{p}$ – низшая теплота сгорания оксида углерода и сжигаемого газа соответственно, кДж/м³.

Определение КПД котлоагрегата нетто по формуле (84) обратного баланса, в процентах [14, 25, 75, 89, 111, 115]:

$$\eta_{\text{нетто}} = 100 - q_2 - q_3 - q_5. \quad (84)$$

Тепловая мощность котлоагрегата $Q$, МВт, вычисляется по формуле (85):

$$Q = Q_{\text{н}}^{p} \cdot B_{\text{г}}, \quad (85)$$

где $B_{\text{г}}$ – часовой расход газа, м³/ч, определяемый по формуле (86):

$$B_{\text{г}} = B_{\text{сч}} \cdot \frac{T+20}{760} \cdot \frac{P_{\text{Г}} + P_{\text{б}}}{273 + t_{\text{Г}}}, \quad (86)$$

где $B_{\text{сч}}$ – расход газа по счетчику, м³/ч;

$P_{\text{Г}}$ – давление газа перед счетчиком, мм вод. ст.;

$P_{\text{б}}$ – барометрическое давление, мм рт. ст.;

$t_{\text{Г}}$ – температура газа, ºС.

Определение удельного расхода топлива $b$ на выработку 1 Гкал тепла, м³/Гкал, вычисляется по формуле (87):

$$b = \frac{10^8}{Q_{\text{н}}^{p} \cdot \eta^{\text{бр}}}, \quad (87)$$

где $\eta^{\text{бр}}$ – коэффициент полезного действия Брутто, в процентах.

Определение удельного расхода условного топлива на выработку 1 Гкал тепла, кг у. т./Гкал, вычисляется по формуле (88):

$$b = \frac{10^8}{7000 \cdot \eta^{\text{бр}}}. \quad (88)$$

Определение расхода воды через котел Д, т/ч, вычисляется по формуле (89):

$$\text{Д} = \frac{Q}{c\,(t_B'' - t_B')} \cdot 10^{-3}, \quad (89)$$

где $Q$ – теплопроизводительность котлоагрегата, ГДж/ч;

$t_B'$, $t_B''$ – температура прямой и обратной воды на входе и выходе из котлоагрегата, ºС;

$c$ – теплоёмкость воды, кДж/кг·ºС.

Определение теплового напряжения поверхностей нагрева (теплосъема), кДж/м²·ч, согласно формулы (90):

$$q_v = \frac{Q}{F_n}, \tag{90}$$

где $F_n$ – площадь поверхности нагрева, м$^2$.

Пересчет количества содержания угарного газа $CO$ и окислов азота из показаний прибора газоанализатора цифрового комбинированного «TESTO–300» (ppm) в мг/м³ с приведением к $O_2$, согласно формул (91) и (92):

$$CO = CO_{(PPM)} \cdot 1{,}25, \tag{91}$$

$$NO_X = NO_{X(PPM)} \cdot 2{,}05, \tag{92}$$

где $CO_{(PPM)}$ – концентрация угарного газа $CO$ в продуктах сгорания, измеренная с помощью газоанализатора цифрового комбинированного «TESTO–300», ppm;

$NO_{X(PPM)}$ – концентрация $NO_X$ в продуктах сгорания, измеренная с помощью газоанализатора цифрового комбинированного «TESTO–300», ppm.

### 4.3 Определение теплового баланса котла «Protherm KLOM»

Исследования и разработка режимной карты проводились для 8 режимов работы котла, начиная с минимально возможной по тепловой мощности, которая для котла «Protherm KLOM» составляет 10 кВт.

Эмпирическая зависимость часового расхода газа от тепловой мощности котла «Protherm KLOM» имеет вид (93):

$$B = 3{,}38 + 0{,}002 \cdot Q. \tag{93}$$

Данная зависимость позволяет приближенно оценить расход газа для различных значений мощности котла [71].

Результат проведенных испытаний показал, что изменение теплового напряжения при увеличении тепловой нагрузки котла имеет линейный характер, показанный на рисунке 4.4.

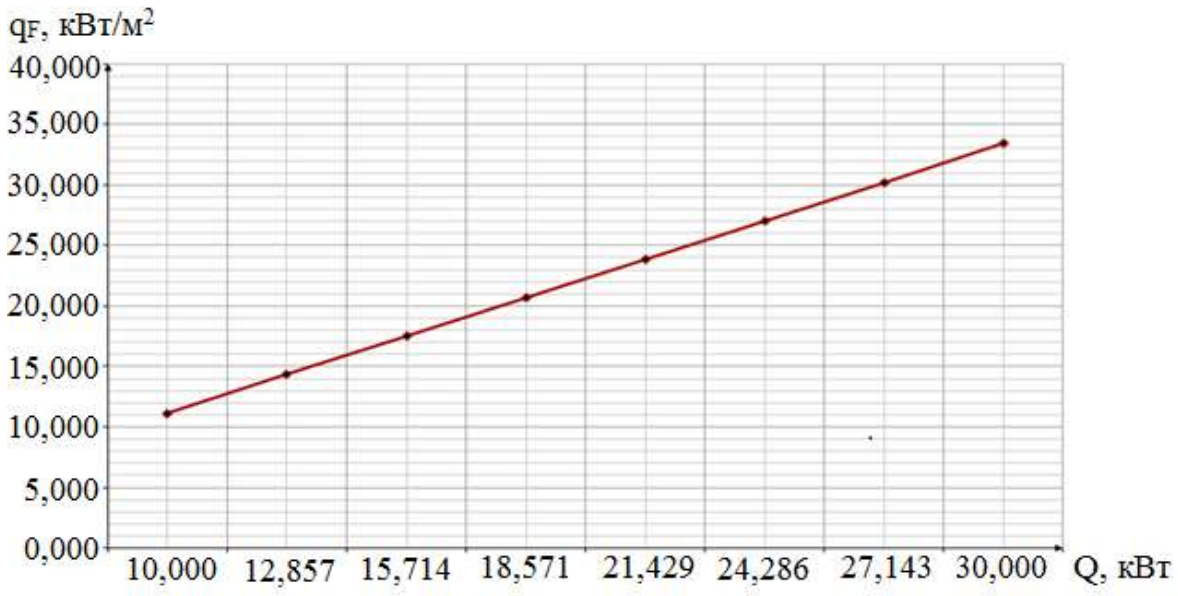


Рисунок 4.4 – Зависимость теплового напряжения от тепловой мощности котла

Для каждого режима определялся необходимый расход газа, изменение которого показано на рисунке 4.5.

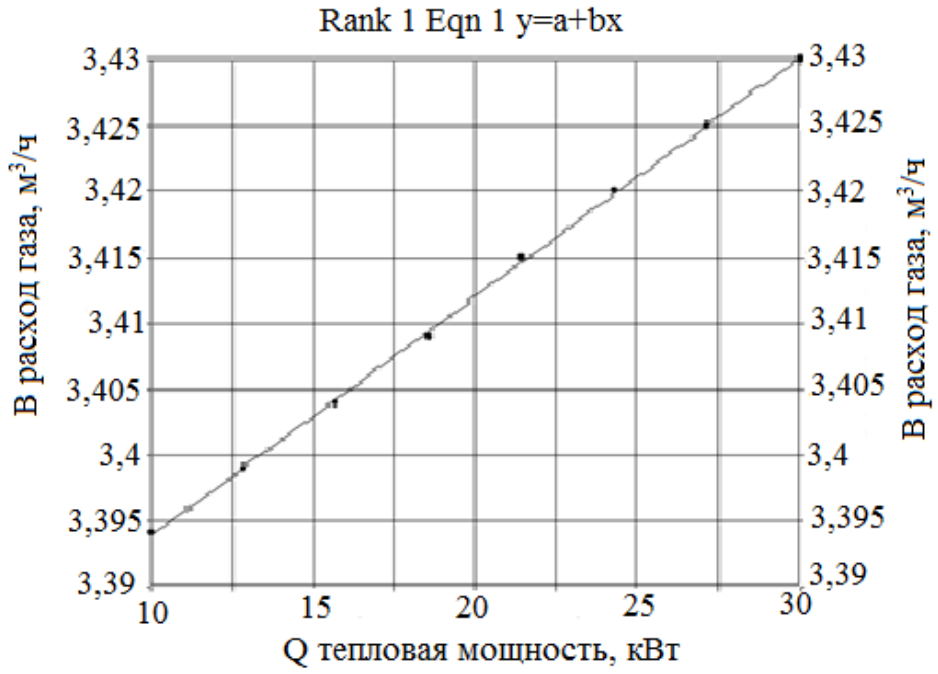


Рисунок 4.5 – Зависимость расхода газа от тепловой мощности котла

Для каждого режима по достижению котельным агрегатом стабильности показаний по температуре уходящих газов и температуре теплоносителя проводились инструментальные исследования энерго–экологических показателей, результаты которых приводятся в режимной карте, указанной в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Результаты испытаний разработанной инжекционной горелки, работающей на газе низкого давления

| Наименование параметров | Единица измерения | Режимы работы котла «Protherm KLOM» 30 кВт | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Тепловая мощность | % | 30,0 | 40,0 | 50,0 | 60,0 | 70,0 | 80,0 | 90,0 | 100,0 |
| | кВт | 10,0 | 12,86 | 15,71 | 18,57 | 21,43 | 24,29 | 27,14 | 30,0 |
| Давление газа перед горелкой | Па | 1400 | 1486 | 1571 | 1657 | 1743 | 1828 | 1914 | 2000 |
| Расход газа (при н.у.) | $м^3$/ч | 3,394 | 3,399 | 3,404 | 3,409 | 3,415 | 3,420 | 3,425 | 3,430 |
| | $м^3$/год | 29731,12 | 29775,89 | 29820,81 | 29865,86 | 29911,04 | 29956,36 | 30001,82 | 30047,41 |
| | тыс. $м^3$/год | 29,73 | 29,78 | 29,82 | 29,87 | 29,91 | 29,96 | 30,00 | 30,05 |
| Коэффициент избытка воздуха за котлом *α1* | – | 0,6 | | | | | | | |
| Содержание $CO_2$ за котлом | % | 6,50 | 6,71 | 6,78 | 6,80 | 6,80 | 6,80 | 6,80 | 6,80 |
| Содержание $O_2$ за котлом | % | 12,0 | 8,5 | 7,0 | 6,3 | 5,9 | 5,5 | 5,3 | 5,2 |
| Содержание *NOx* за котлом | ppm | 178,000 | 178,060 | 178,080 | 178,072 | 178,056 | 178,120 | 178,104 | 178,088 |
| | мг/$м^3$ | 222,500 | 222,575 | 222,600 | 222,590 | 222,570 | 222,650 | 222,630 | 222,610 |
| Содержание *COx* за котлом | ppm | 267,400 | 267,428 | 267,438 | 267,440 | 267,440 | 267,440 | 267,440 | 267,440 |
| | мг/$м^3$ | 334,250 | 334,285 | 334,297 | 334,300 | 334,300 | 334,300 | 334,300 | 334,300 |

Продолжение таблицы 4.1

| Наименование параметров | Единица измерения | Режимы работы котла «Protherm KLOM» 30 кВт | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Бенз/а/пирен (3, 4 – Бензпирен) | ppm | 0,006 | 0,006 | 0,005 | 0,003 | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,002 |
| | мг/м$^3$ | 0,008 | 0,008 | 0,006 | 0,004 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,002 |
| Тепловое напряжение поверхностей нагрева (теплосъем) | кВт/м$^2$ | 11,13 | 14,31 | 17,50 | 20,67 | 23,85 | 27,04 | 30,22 | 33,39 |
| Температура уходящих газов | °С | 110 | 116 | 121 | 127 | 129 | 129 | 129 | 130 |
| КПД котла | % | 94,87 | 94,91 | 94,93 | 94,94 | 94,97 | 95,01 | 95,03 | 94,05 |
| $q_5$ (по измеренным температурам наружной поверхности котла) | % | 1,33 | 1,24 | 1,17 | 1,14 | 1,08 | 1,00 | 0,97 | 0,85 |
| $q_2$ | % | 3,80 | 3,85 | 3,90 | 3,92 | 3,95 | 3,99 | 4,00 | 4,10 |
| Нагрев воды в котле (перепад на входе и выходе) | °С | 20 | | | | | | | |
| Уровень звукового давления | дБ | 46 | | | | | | | |

## 4.4 Энерго–экологические показатели работы горелки новой конструкции

Энерго–экологические показатели работы котлоагрегата [26]:

– расход газа;

– тепловая мощность газогорелочного устройства;

– коэффициент избытка воздуха;

– КПД котлоагрегата;

– температура уходящих газов;

– потери теплоты с уходящими газами;

– потери теплоты от поверхности нагрева в окружающую среду;

– потери теплоты от химической неполноты сгорания топлива;

– концентрации продуктов сгорания (окислов азота и углерода, бенз/а/пирена).

Результаты испытаний показали следующее:

– устойчивая работа котлоагрегата осуществляется в диапазоне нагрузок от 10 до 30 кВт;

– потери теплоты от химической неполноты сгорания отсутствуют;

– потери теплоты с уходящими газами с ростом тепловой производительности котлоагрегата изменялись в пределах 3,3–5,5 %, при этом температура уходящих газов возрастала от 110 до 130 ºС;

– КПД котла в пределах исследуемых нагрузок составило 93,5– 95 %.

Зависимость между коэффициентом избытка воздуха и расходом газа оказывает непосредственное влияние на концентрацию окислов азота и углерода, а также бенз/а/пирена в уходящих газах. На рисунке 4.6 показана характерная зависимость между коэффициентом избытка воздуха и расходом газа для котлов малой мощности в сравнении с результатами эксперимента [72].

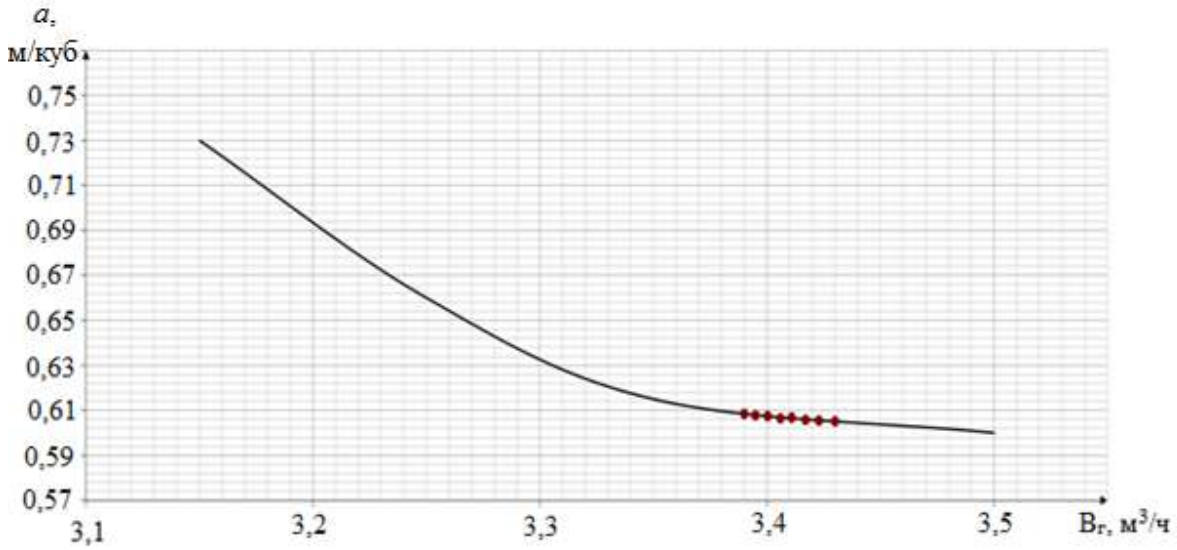


Рисунок 4.6 – Зависимость коэффициента первичного избытка воздуха от расхода газа: – изменение коэффициента первичного воздуха, построенная по литературным данным; – экспериментальные точки

Экспериментальные значения коэффициента первичного воздуха в исследованном диапазоне расхода газа достаточно хорошо согласуются с результатами, построенными по данным [75]. К факторам, влияющим на концентрацию *NOx* и *COx* в продуктах сгорания природного газа, относятся расход газа, тепловая мощность, а также коэффициент избытка воздуха [66, 88, 129]. Экспериментальные исследования показали, что изменения коэффициента избытка воздуха незначительны для диапазона работы котла от 10 до 30 кВт, поэтому их влиянием можно пренебречь.

Зависимость образования оксидов азота от величины расхода газа имеет ярко выраженный не линейный характер и при уменьшении тепловой нагрузки от 100 до 30 %, концентрация *NOx* снижается на 0,1 % (рисунок 4.7). На рисунках 4.7–4.8 приведены характеристики работы горелки, полученные по экспериментальным данным на 8 режимах работы котла, из которых видно, что исследуемые значения концентраций оксидов углерода и бенз/а/пирена не превышают нормируемых [66, 67, 80].

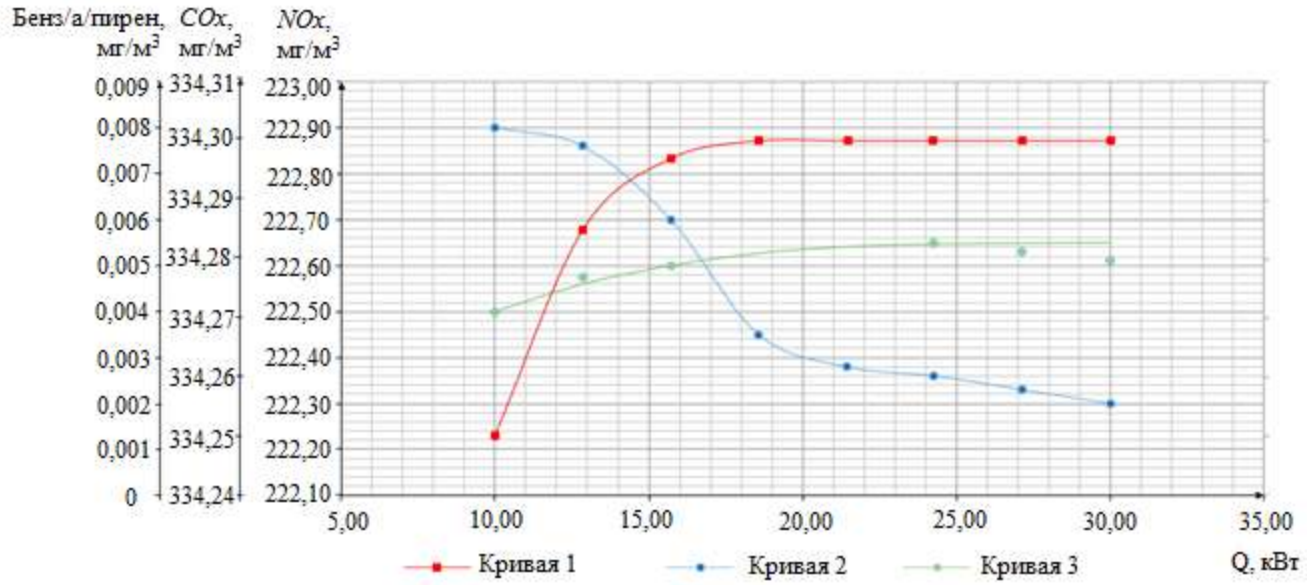


Рисунок 4.7 – Содержание вредных веществ *COx*, *NOx* и бенз/а/пирена в уходящих газах в зависимости от тепловой мощности:
кривая 1 – изменение концентрации *COx*;
кривая 2 – изменение концентрации бенз/а/пирена;
кривая 3 – изменение концентрации *NOx*

Концентрации *COx*, начиная с тепловой мощности 18 кВт практически не изменяется, а на низких значениях тепловой мощности до 18 кВт увеличивается на 0,02 %. Полученные значения бенз/а/пирена значительно ниже норм ПДК. Концентрация бенз/а/пирена в уходящих газах снижаются на 75 % при увеличении тепловой мощности котлоагрегата. Концентрация $O_2$ при увеличении тепловой мощности также снижается на 6,8 %, что подтверждает качественное сжигание

газа. Характер изменения кривой совпадает с изменением количества воздуха необходимого для процесса горения согласно рисунку 4.8.

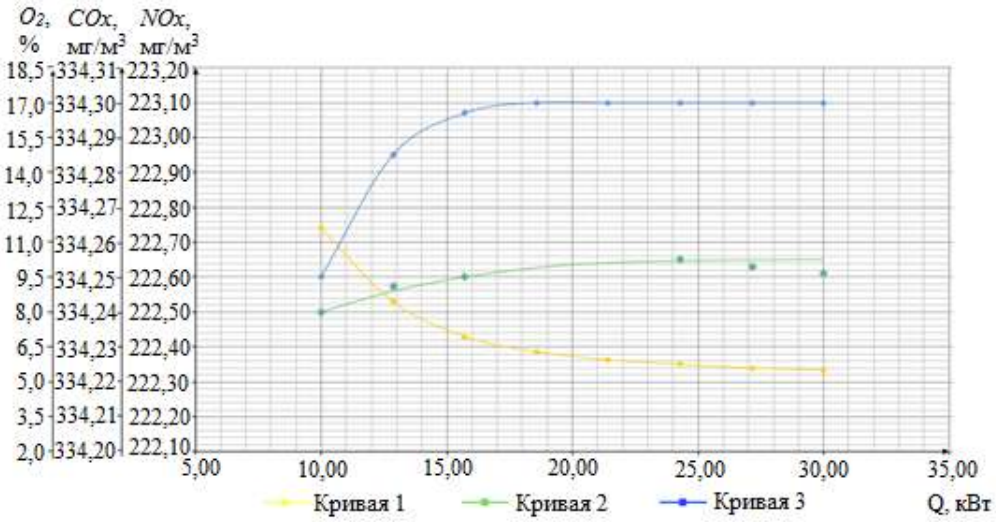


Рисунок 4.8 – Содержание вредных веществ *COx*, *NOx* и $O_2$ в уходящих газах в зависимости от тепловой мощности:
кривая 1 – изменение концентрации $O_2$;
кривая 2 – изменение концентрации *NOx*;
кривая 3 – изменение концентрации *COx*

Характер изменения значений температуры уходящих газов и потерь теплоты с уходящими газами в зависимости от тепловой мощности котла совпадают, что показано на рисунке 4.9, и сохраняют тенденцию к увеличению при повышении тепловой нагрузки. Такой характер изменения величин подтверждается теорией горения газа [73-79].

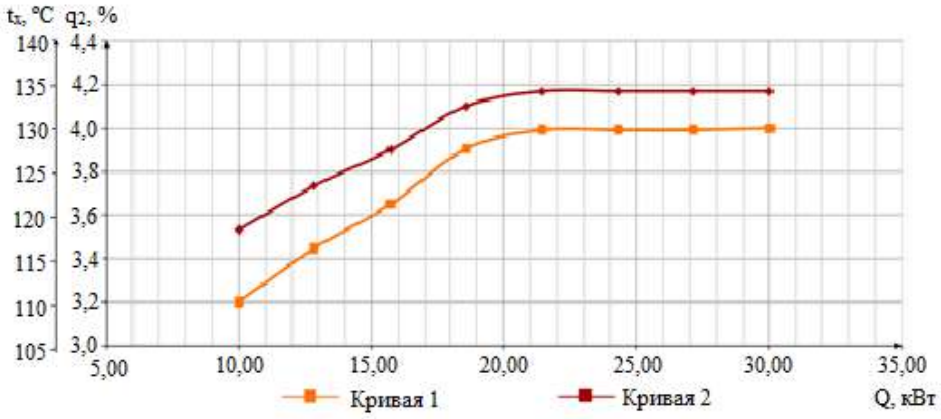


Рисунок 4.9 – Зависимость температуры уходящих газов и потерь теплоты с уходящими газами от тепловой мощности котла:
кривая 1 – изменение температуры уходящих газов;
кривая 2 – изменения потерь теплоты с уходящими газами

Концентрация кислорода в продуктах сгорания в разработанной инжекционной горелки по сравнению с горелкой, такого же типа, импортного образца снижена на 30 – 50% согласно рисунку 4.10.

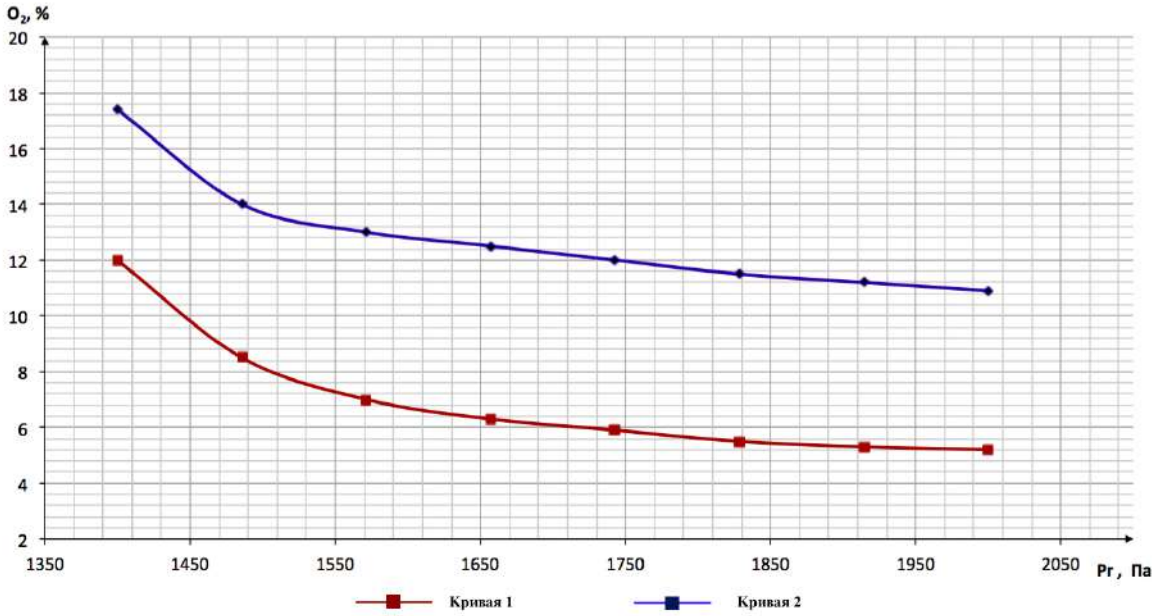


Рисунок 4.10 – Изменение концентрации кислорода за котлом при работе инжекционных горелки в зависимости от давления газа:
кривая 1– импортный образец;
кривая 2 – разработанная конструкция ГГУ.

При этом сохраняется характер снижения концентрации при увеличении давления газовоздушной смеси. Кривая 1 на рисунке 4.10 характеризует изменение концентрации кислорода за котлом для инжекционной горелки импортного образца. Кривая 2 характеризует изменение концентрации кислорода за котлом при работе разработанного ГГУ.

Сравнивая характеристики режимов работы котлоагрегата с разработанным ГГУ, приведенных в режимной карте на таблице 4.1, можно сделать вывод, что максимальное значение КПД соответствует минимальным значениям потерь теплоты с уходящими газами $q_2$ и потерь теплоты от нагретых поверхностей в окружающую среду $q_5$, показанных на рисунке 4.11.

По результатам натурных испытаний эффективности сжигания газа в котле типа «Protherm KLOM» с разработанным ГГУ можно сделать следующие выводы:

– концентрации вредных веществ в уходящих газах зависят от тепловой мощности котла и в рабочем диапазоне тепловых нагрузок не превышают ПДК по отдельным ингредиентам;

– при работе котлоагрегата при минимальном тепловом режиме (10 кВт) концентрации вредных веществ в уходящих газах выше, но также не превышают ПДК по отдельным ингредиентам;

– концентрации *NOx* в уходящих газах, полученные при математическом моделировании процесса горения в котле «Protherm KLOM» с разработанным ГГУ, также не превышают ПДК [82, 83].

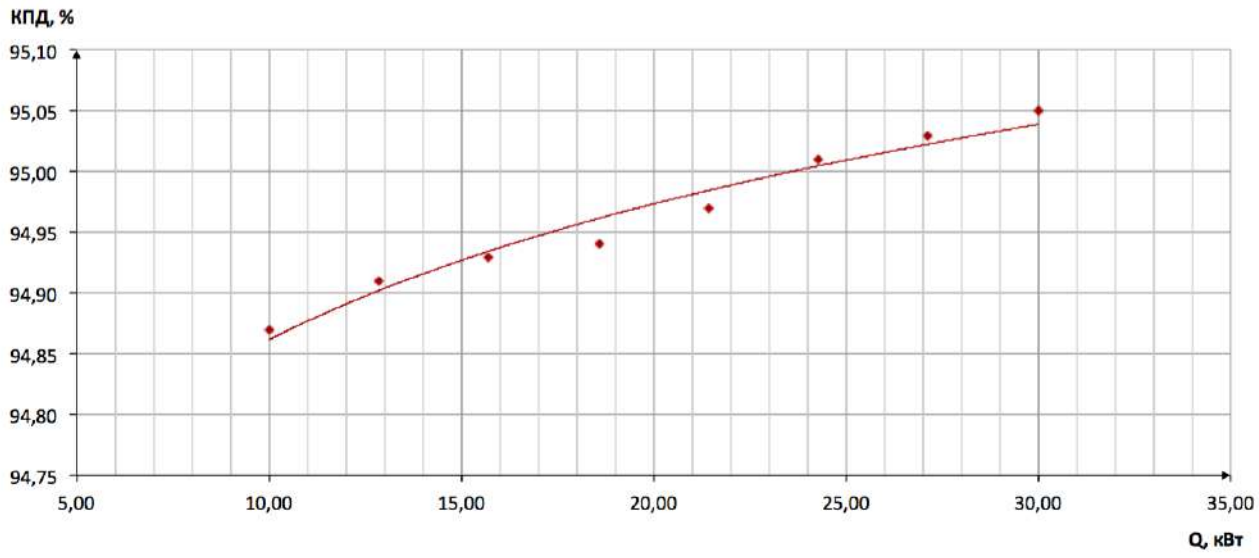


Рисунок 4.11 – Зависимость КПД от тепловой мощности котла

Сравнение натурных значений *NOx* в уходящих газах и полученных при моделировании процесса горения в топке котла приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Сравнение расчетных и экспериментальных значений концентрации *NOx* в уходящих газах (ПДК *NOx* =250 мг/м$^3$)

| Тепловая мощность котлоагрегата, кВт | 15 | 20 | 25 | 30 |
|---|---|---|---|---|
| Расчетные значения *NOx*, полученные при моделировании процесса горения, мг/м$^3$ | 243,49 | 223,20 | 216,33 | 212,41 |
| Экспериментальные, значения NOx, полученные при натурных измерениях, мг/м$^3$ | 222,58 | 222,60 | 222,59 | 222,57 |
| Сравнение расчетных и экспериментальных значений, % | 8,60 | 0,30 | 2,90 | 4,80 |

Из таблицы следует, что отличие натурных данных от расчетных зависит от тепловой мощности котлоагрегата и соответствует диапазону 0,3–8,6 %. Таким образом, максимальное отличие значений концентраций *NOx* в уходящих газах не

превышает 10 %. Это позволяет сделать вывод, что концентрации вредных веществ в топке котла при сжигании газа также соответствуют нормативным требованиям.

### 4.5 Результаты исследований потери теплоты в окружающую среду

В результате исследований скорректированы значения величины теплопотерь в окружающую среду от нагретых поверхностей котлоагрегата [84, 147, 148].

Температура поверхности каждого котла $t_n$ каскадной установки определялась с помощью тепловизора «Testo 820», пипрометра и контактного термометра ТК 5–01М.

На рисунке 4.12 приведена зависимость потерь теплоты от нагретой поверхности котла в окружающую среду от тепловой мощности котла.

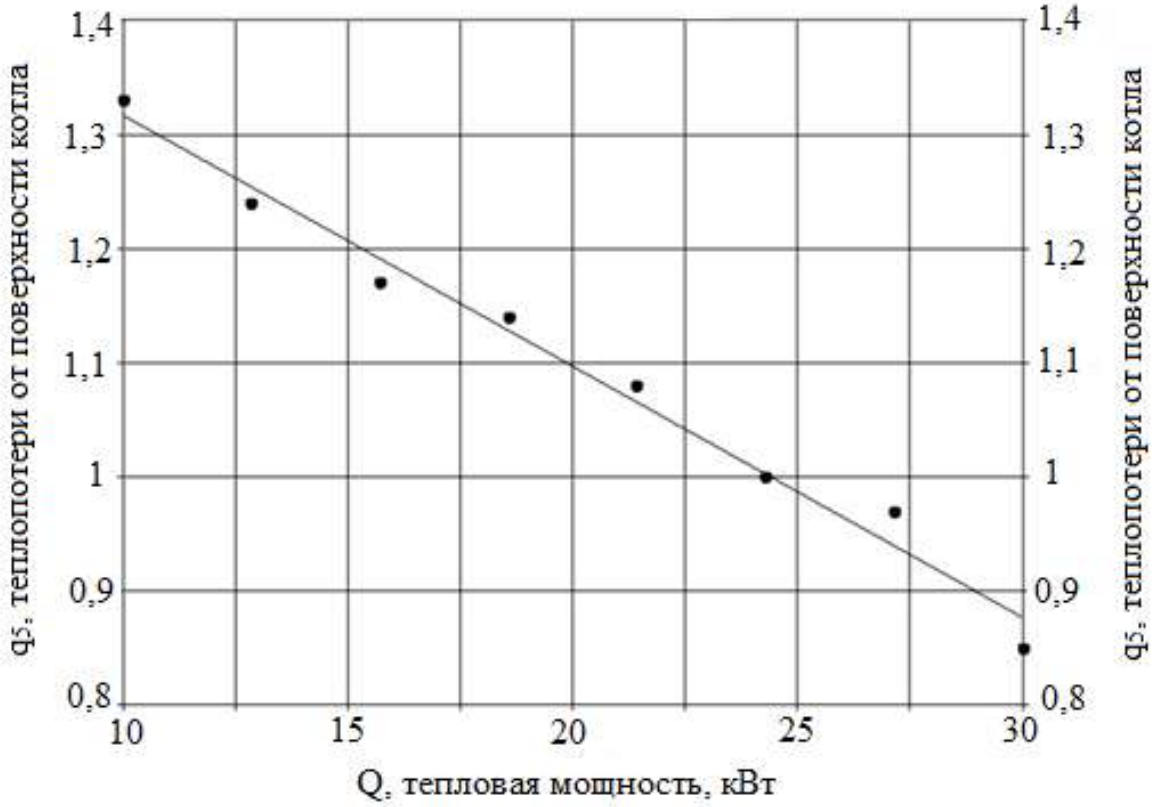


Рисунок 4.12 – Зависимость потерь теплоты от нагретой поверхности котла в окружающую среду от тепловой мощности котла

Эмпирическая зависимость, потери теплоты водогрейным котлом малой мощности в окружающую среду имеет вид (94):

$$q_5 = 1{,}54 - 0{,}022 \cdot Q, \quad (94)$$

где $q_5$, $Q$ – соответственно потери теплоты водогрейным котлом малой мощности в окружающую среду и тепловая мощность котлоагрегата.

На рисунке 4.13 дано сравнение полученных значений теплопотерь с поверхности котолоагрегата при натурных исследованиях с известными в литературе зависимостями [8, 11, 75, 146, 149].

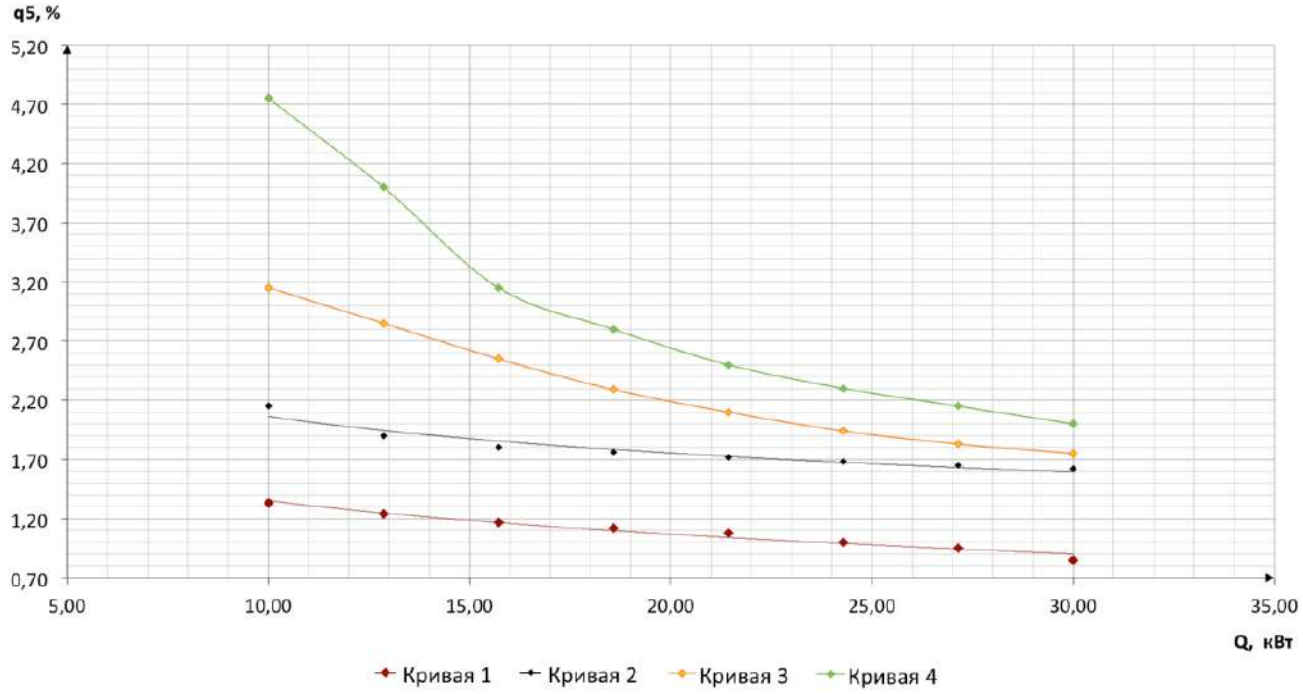


Рисунок 4.13 – Зависимость потерь теплоты в окружающую среду от тепловой мощности для водогрейных котлов:
кривая 1 – изменения величины потерь теплоты котла в окружающую среду, построенная по результатам экспериментальных исследований, в зависимости от тепловой мощности; кривая 2 – изменения величины потерь теплоты котла в окружающую среду, построенная по результатам расчета, выполненного по известным методикам, в зависимости от тепловой мощности; кривая 3 – изменения величины потери теплоты по диссертационным значениям [8, 11]; кривая 4 – изменения величины потери теплоты у котлов малой мощности по литературным значениям [75]

По результатам сравнения величины потерь теплоты $q_5$ котла с до установки расчетной горелки и с работой на штатной горелки (рисунок 4.13) можно сделать следующие выводы:

– теплопотери $q_5$ с нагретой поверхности котла с горелкой разработанной конструкции в 1,6 раза ниже, чем для котла «Protherm KLOM» с штатной горелкой, вследствие повышения качества эффективности сжигания газа;

– теплопотери $q_5$ с нагретой поверхности котла «Энергия 3», площадь которой в 77 раза больше, чем у «Protherm KLOM» с горелкой нового образца в 2,4 раза выше (поверхность нагрева «Protherm KLOM» –1,03 м$^2$, с поверхностью нагрева «Энергия 3»– 69,1 м$^2$);

– величина потерь теплоты $q_5$, по результатам, известным в литературе [75], снижается в 2–3 раза с увеличением тепловой мощности котлов, что соответствует результатам натурных экспериментов [85].

# 5 ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ

## 5.1 Введение

Применение современных технологии энергосбережения в теплоэнергетики всегда актуально.

Термическое оборудование, газовые котлы являются одним из наиболее значительных потребителей энергоносителей (газ, электричество) и ресурсов (огнеупоры, нагреватели, электроды, медь, газы, масла, вода и т. д.) на металлургических, машиностроительных предприятиях, предприятиях производителях керамики, фарфора и ЖКХ.

Доля полезного тепла (КПД) по сравнению с общим энергопотреблением составляет часто лишь 60...80 % для котлов и термического оборудования, работающего на газе, и 60...70 % для электротермического оборудования [86-88].

Стоимость энергоносителей постоянно растет, особенно в последнее время.

Учитывая высокую степень энергопотребления при эксплуатации котлов, термического оборудования, особо актуальным представляется вопрос об осуществлении жёсткой экономии энергии путём применения технологий энергосбережения. К таким технологиям относят усовершенствование способов подогрева воздуха для горения, применения новых технологий сжигания газа конструкций отопительных аппаратов и реконструкции существующих котлов [144-146].

В настоящее время на предприятии ООО «АстанГаз» находится в эксплуатации устаревший котел с КПД не более 60 %. Поставленная задача повысить КПД, снизить расходы на энергоресурсы, а также улучшить конструкцию горелочного устройства.

В технико-экономическом расчете выпускной научно-квалификационной работы рассматривается техническое перевооружение газового котла на предприятии ООО «АстанГаз» города Миасса, Челябинской области.

Целью расчета является оценка целесообразности проекта и его эффективности, а также проведение оценочного анализа сроков и стоимости реализации технического перевооружения.

Для расчета экономической эффективности рассмотрим работу котла до и после установки разработанной инжекционной горелки.

## 5.2 Расчет капитальных и текущих затрат

Количественные показатели по топливу и электроэнергии приняты по данным соответствующих разделов проекта; амортизационные отчисления котла определены по нормам и отчисления в ремонтный фонд приняты в размере 10 % от суммы амортизационных отчислений; общепроизводственные и прочие расходы приняты в размере 80 тыс. руб. [89, 142, 143].

### 5.2.1 Исходные данные

Исходные данные приведены в таблице 5.1

Таблица 5.1 – Исходные данные

| Параметры | Единица измерения | Значение | |
|---|---|---|---|
| | | до | после |
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| Площадь обогрева | $м^2$ | 500 | 500 |
| Цикл полного нагрева воды | ч | 4 | 4 |
| Расход газа за один цикл | $м^3$ | 35 | 23 |
| Стоимость газа | руб./тыс. $м^3$ | 129,02 | 70,656 |

### 5.2.2 Смета капитальных затрат

Капитальные вложения на техническое перевооружение ООО «АстанГаз» выполнены в ценах февраля 2020 года.

Стоимость затрат на разработку, транспортные расходы, демонтажные и монтажные работы, а также прочие расходы приведены из схожего проекта компании ООО «Колос» [90, 91, 141].

Стоимость оборудования приведена из электронных каталогов фирм производителей соответствующего оборудования и материалов.

Смета капитальных затрат представлена в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Смета капитальных затрат на техническое перевооружение котла

| Параметры | Единица измерения | Значение |
|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 |
| Затраты на разработку проекта | тыс. руб. | 60,10 |
| Транспортные расходы | тыс. руб. | 8,40 |
| Демонтажные работы | тыс. руб. | 10,60 |
| Оборудование:<br>- Газовый клапан 820 Sit<br>- Футеровка<br>- Горелка инжекционная (5 шт.)<br>- КИПиА (Siemens)<br>- Прочее оборудование | тыс. руб. | <br>6,89<br>1,45<br>10,46<br>10,66<br>2,60 |

Продолжение таблицы 5.2

| 1 | 2 | 3 |
|---|---|---|
| Монтажные работы:<br>- Горелочная рампа<br>- Газовая обвязка<br>- Система автоматики и линии | тыс. руб. | 9,90<br>16,70<br>13,30 |
| Установка горелок + пусконаладочные работы | тыс. руб. | 20,20 |
| Прочие расходы | тыс. руб. | 6,40 |
| Общие капитальные затраты | тыс. руб. | 16,66 |

Капитальные затраты на техническое перевооружение котла равны:

$$К_{31} = 60{,}10 + 8{,}40 + 10{,}60 + 6{,}89 + 1{,}45 + 10{,}46 + 10{,}66 + 2{,}6 + \\ + 9{,}9 + 16{,}7 + 13{,}3 + 20{,}2 + 6{,}4 = 194{,}320 \text{ тыс. руб.}$$

Таким образом затраты на техническое перевооружение котла составят $К_{31}$ = 194,320 тыс. руб., из них затраты на оборудование $К_{32}$ = 32,06 тыс. руб.

### 5.2.3 Годовые эксплуатационные расходы

Сравним текущие затраты до и после технического перевооружения котла, сведем в таблицу полученные данные:

1) До технического перевооружения:

Затраты на топливо $И_m$ определим по формуле (95):

$$И_m = Ц_m \cdot В_{год}, \quad (95)$$

где $Ц_m$ – оптовая цена, потребляемого природного газа, 5,12 руб./м$^3$ [149].

$В_{год}$ – суммарный годовой расход топлива на печь, м$^3$/год.

Расход топлива на котел при средней нагрузке, 35 м$^3$/цикл;

Количество циклов обогрева за один год, 720 шт.;

Суммарный годовой расход топлива на котел, м$^3$/год.

Суммарный годовой расход топлива на котел составляет:

$$В_{год} = 35 \cdot 720 = 25\,200 \text{ м}^3\text{/год.}$$

$$И_m = 5{,}12 \cdot 25\,200 = 129\,024 \text{ тыс. руб./год.}$$

Годовые затраты на электричество определим по формуле (96):

$$И_э = U_{час} \cdot Т \cdot Н, \quad (96)$$

где $U_{час}$ – расход электроэнергии на котел за один час, 0,6 кВт/ч [150];
Т – тариф на электроэнергию для котельных, 3,80 руб./кВт·ч [151];
Н – время работы котла в течение года, 2 880 ч/год.

$$И_э = 0{,}6 \cdot 3{,}80 \cdot 2\,880 = 6\,566{,}4 \text{ тыс. руб./год.}$$

Затраты на содержание и текущий ремонт принимаются равными 1 440,27 руб./год на основании договора ДТО-21 на техническое обслуживание с ООО Колос, стоимость годового обслуживания газового оборудования составит 1000 рублей, и договора ДТО-22 на текущий ремонт с ООО Колос. Стоимость текущего ремонта газового оборудования в течении года составит 440,27 рублей [152]. Наличие данных договоров строго регламентировано Постановлением Правительства РФ от 14.05.2013 N 410 [153].

Общие текущие затраты до реализации проекта техническое перевооружение вычисляются по формуле (97):

$$Т_{31} = И_m + И_э + 28{,}46 = 135{,}618 \text{ тыс. руб.,} \quad (97)$$

2) После технического перевооружения:

Затраты на топливо определим по формуле (98):

$$И_m = Ц_m \cdot В_{год}, \quad (98)$$

где $Ц_m$ – оптовая цена, потребляемого природного газа, 5,12 руб./м$^3$ [149];
$В_{год}$ – суммарный годовой расход топлива на котел, м$^3$/год.

Расход топлива на котел при средней нагрузке, 23 м$^3$/цикл;
Количество циклов нагрева за один год, 600 шт.

Суммарный годовой расход топлива на котел:

$$В_{год} = 23 \cdot 600 = 13\,800 \text{ м}^3\text{/год.}$$

$$И_m = 5{,}12 \cdot 13\,600 = 70{,}656 \text{ тыс. руб./год.}$$

Амортизационные отчисления принимаются в размере 10 % от капитальных затрат на оборудование и вычисляются по формуле (99):

$$И_\alpha = 0{,}1 \cdot К_{32}. \quad (99)$$

$$И_{\alpha} = 0{,}1 \cdot 32{,}06 = 3{,}206 \text{ тыс. руб./год.}$$

Годовые затраты на электричество определим по формуле (100):

$$И_{э} = U_{час} \cdot Т \cdot Н, \quad (100)$$

где $U_{час}$ – расход электроэнергии на котел за один час, 0,5 кВт/ч [150];

Т – тариф на электроэнергию для котельной, 3,80 руб./кВт·ч [151];

Н – время работы котла в течение года, 2 800 ч/год.

$$И_{э} = 0{,}5 \cdot 3{,}80 \cdot 2\,800 = 5\,320 \text{ тыс. руб./год.}$$

Затраты на содержание и текущий ремонт принимаются как 3 % от суммы капитальных затрат на оборудование и вычисляются по формуле (101):

$$И_{тр} = 0{,}045 \cdot К_{32}. \quad (101)$$

$$И_{тр} = 0{,}045 \cdot 32\,006 = 1\,440{,}27 \text{ тыс. руб./год.}$$

Общие текущие затраты после реализации технического перевооружения вычисляются по формуле (102):

$$Т_{32} = И_{m} + И_{э} + И_{тр} = 77\,416{,}27 \text{ тыс. руб.} \quad (102)$$

Себестоимость обогрева помещения до технического перевооружения вычисляется по формуле (103):

$$Р_{терм1} = {}^{Т_{31}}/_{М}, \quad (103)$$

где $Т_{31}$ – общие текущие затраты до реализации проекта, 135,618 тыс. руб.;

М – масса отопительной среды, подвергшейся нагреву в течение одного года, 47 т.

$$Р_{терм1} = {}^{135\,618}/_{47} = 2\,885{,}48 \text{ руб./т.}$$

Себестоимость нагрева отопительной среды до ее рабочего значения после технического перевооружения вычисляется по формуле (104):

$$Р_{терм2} = {}^{Т_{32}}/_{М}, \quad (104)$$

где $Т_{32}$ – общие текущие затраты после реализации проекта, 77 416,27 тыс. руб.

$$Р_{терм2} = {}^{77\,416,27}/_{47} = 1\,647,15 \text{ руб./т.}$$

Удельное снижение себестоимости нагрева по формуле (105):

$$\Delta Р_{терм} = Р_{терм1} - Р_{терм2}, \quad (105)$$

$$\Delta Р_{терм} = 2\,885,48 - 1\,647,15 = 1\,238,32 \text{ руб./т.}$$

Технико-экономические показатели технического перевооружения котла на ООО «АстанГаз» сведены в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Технико-экономические показатели технического перевооружения котла ООО «АстанГаз»

| Наименование затрат | Единица измерения | Величина | |
|---|---|---|---|
| | | до | после |
| Расход газа | $м^3$/год | 25 200 | 19 600 |
| Тариф на газ | руб./$м^3$ | 5,12 | 5,120 |
| Расход электрической энергии | кВт/час | 0,60 | 0,500 |
| Тариф на электрическую энергию | руб. за кВт час | 3,80 | 3,800 |
| Годовой расход топлива | $м^3$/год | 25 200 | 19 600 |
| Обслуживание оборудования и его текущий ремонт (1 % от стоимости оборудования) | тыс. руб./год | 80,00 | 28,460 |
| Амортизация (10 % от стоимости оборудования) | тыс. руб./год | - | 3,206 |
| Итого текущих расходов | тыс. руб./год | 14,87 | 8,790 |
| Себестоимость нагрева | руб./т | 2 885,48 | 2 278,970 |
| Годовая экономия | руб./год | 55 020,51 | |

### 5.2.4 Расчет срока окупаемости проекта

Срок окупаемости проекта вычисляется по формуле (106):

$$Т_{ок} = {}^{К_{31}}/_{\Delta U}, \quad (106)$$

где $К_{31}$ – сумма капитальных затрат, тыс. руб.;

$\Delta U$ – разность текущих затрат, тыс. руб./год.

$$Т_{ок} = {}^{194\,320}/_{(135\,618 - 77\,416{,}27)} = 3{,}33 \text{ года.}$$

$Т_{ок}$ = 3,33 года ≤ 5 лет (средний срок возврата кредитных средств).

Срок окупаемости составляет 3,3 года, что является хорошим результатом, поэтому проект по техническому перевооружению котла котла можно считать эффективным [92, 131, 132].

Анализ и сравнение данных показателей позволяют сделать вывод об экономической целесообразности проекта. Вложив 194,320 тыс. руб. инвестиций (в текущих ценах 2020 г.), мы получаем годовую экономию 55 020,51 тыс. руб.

При реализации проекта мы достаточно быстро окупим средства, вложенные в реализацию проекта.

### 5.3 Модель причинно-следственной диаграммы

На рисунке 5.1 представлена модель диаграммы, которая позволяет выявить причинно-следственную связь тенденций, повлекших к понижению эффективности процессов горения.

Рисунок 5.1 – Модель причинно-следственной диаграммы

## 5.4 SWOT-анализ вариантов технических решений

Качественный подход к описанию рисков заключается в детальном и последовательном рассмотрении содержательных факторов, несущих неопределенность, и завершается формированием причин основных рисков и мер по их снижению. Одной из методик анализа сильных и слабых сторон предприятия, его внешних, благоприятных возможностей и угроз является SWOT-анализ: составляются четыре матрицы, в которых приводятся сильные (S) и слабые (W) стороны, возможности (O) и угрозы (T) каждого решения (оценка внешних и внутренних факторов) [93, 94, 102, 130].

SWOT-анализ – это определение сильных и слабых сторон предприятия, а также возможностей и угроз, исходящих из его ближайшего окружения (внешней среды).

S – Сильные стороны (Strengths) преимущества предприятия;

W – Слабые стороны (Weaknesses) недостатки предприятия;

O – Возможности (Opportunities) факторы внешней среды, использование которых создаст преимущества предприятия на рынке;

T – Угрозы (Threats) факторы, которые могут потенциально ухудшить положение предприятия на рынке.

Проведя SWOT-анализ, представленный в таблице 5.4, мы определили сильные и слабые стороны, а также возможности и угрозы внешней среды. Можно сделать вывод о том, что техническое перевооружение котла на ООО «АстанГаз» является эффективным решением. Это позволит предприятию сэкономить затраты на производство, а также расширить свой ассортимент и получить дополнительный стабильный доход. Стоит отметить, что техническое перевооружение котла не потребует увеличения штата сотрудников и значительных дополнительных эксплуатационных затрат, что несомненно является плюсом в пользу этого проекта [95, 129, 130, 139].

Таблица 5.4 – SWOT-анализ с учетом внедрения технического перевооружения

| | |
|---|---|
| Сильные стороны (S):<br>1) Быстрая окупаемость и эффективность проекта<br>2) Низкий уровень выбросов<br>3) Высокое качество нагрева отопительной среды<br>4) Экономия топлива<br>5) Надежность и долговечность работы | Слабые стороны (W):<br>1) Значительные капитальные затраты |
| Возможности (O):<br>1) Обмен опытом по ремонту и обслуживанию газовых котлов у иностранного производителя. | Угрозы (T):<br>1) Нестабильность курса валют<br>2) Неустойчивые взаимоотношения с иностранными партнерами |

Прежний вариант – эксплуатация котла без технического перевооружения, представлен в таблице 5.5

Таблица 5.5 – SWOT-анализ без внедрения технического перевооружения

| | |
|---|---|
| Сильные стороны (S):<br>1) Отработанные технологии производства с использованием старых типов оборудования<br>2) Имеющие более низкую стоимость ремонтные работы и запчасти | Слабые стороны (W):<br>1) Низкий уровень нагрева<br>2) Повышенный расход топлива<br>3) Многочисленные ремонты<br>4) Недопустимость частых остановок котла<br>5) Несоответствие системы безопасности современным требованиям |
| Возможности (O):<br>1) Большое количество запчастей для ремонта и обслуживания на рынке | Угрозы (T):<br>1) Рост тарифов на газ;<br>2) Снижение спроса на продукцию в связи с поломками котла<br>3) Лишение рынков сбыта из-за нестабильной политической ситуации на рынке сбыта |

## 5.5 Оценка движущих и сдерживающих сил и ресурсов проекта технического перевооружения котла

Анализ поля сил Курта Левина – это метод выявления и оценки группы факторов, способствующих осуществлению проекта или ему противодействующих.

Цель метода: оценка сильных и слабых сторон проекта.

Использование метода: «Анализ поля сил» – практический инструмент, используемый для понимания того, почему проект будет или не будет реализован. «Анализ поля сил» помогает разработать конкретную стратегию реализации проекта с учетом влияния действия этих сил [96-98].

На реализацию проекта по техническому перевооружению котла, расположенного на предприятии ООО «АстанГаз» города Миасса, Челябинской области к 01.12.2019 г. могут повлиять движущие и сдерживающие силы, указанные на рисунке 5.2

Срок окупаемости является самым главным критерием эффективности проекта, поэтому этот показатель оказывает сильное влияние. Увеличение ассортимента продукции также ведет к стабильному доходу, поэтому необходимость технического перевооружения имеет среднее влияние. Большой опыт эксплуатации оборудования и положительный опыт работы с проектной организацией также позволит завершить проект в срок.

Стоимость оборудования и монтажа является достаточно серьезной проблемой при разработке любого технического проекта. Нехватка средств заставляет

использовать заемные деньги, что также в некоторой степени повышает стоимость реализации проекта. Именно этот фактор оказывает сильное отрицательное влияние. Рост цен на топливо происходит каждый год. Это увеличивает текущие затраты, поэтому такой фактор оказывает среднее влияние.

Соотношение влияния движущих и сдерживающих сил показаны на рисунке 5.2.

Рисунок 5.2 – Поле сил изменений проекта технического перевооружения котла на ООО «АстанГаз»

По данному полю сил можно сделать вывод о том, что движущие силы в совокупности с потенциалом изменений преобладают над сдерживающими силами. Это значит, что проект может и должен быть реализован, а после технического перевооружения значительно повысится экономичность производства. Кроме того, данное мероприятие позволит снизить себестоимость термообработки, что принесет предприятию стабильную дополнительную прибыль [99, 137, 138].

## 5.6 Планирование целей проекта технического перевооружения котла на ООО «АстанГаз» в дереве целей

Дерево целей – это структурированная, построенная по иерархическому принципу (распределенная по уровням) совокупность целей проекта, в которой выделены генеральная цель («вершина дерева»); подчиненные ей подцели первого, второго и последующего уровней организации («ветви дерева»).

На рисунке 5.3 изображено дерево целей проекта по техническому перевооружению котла на предприятии ООО «АстанГаз», города Миасса, Челябинской области.

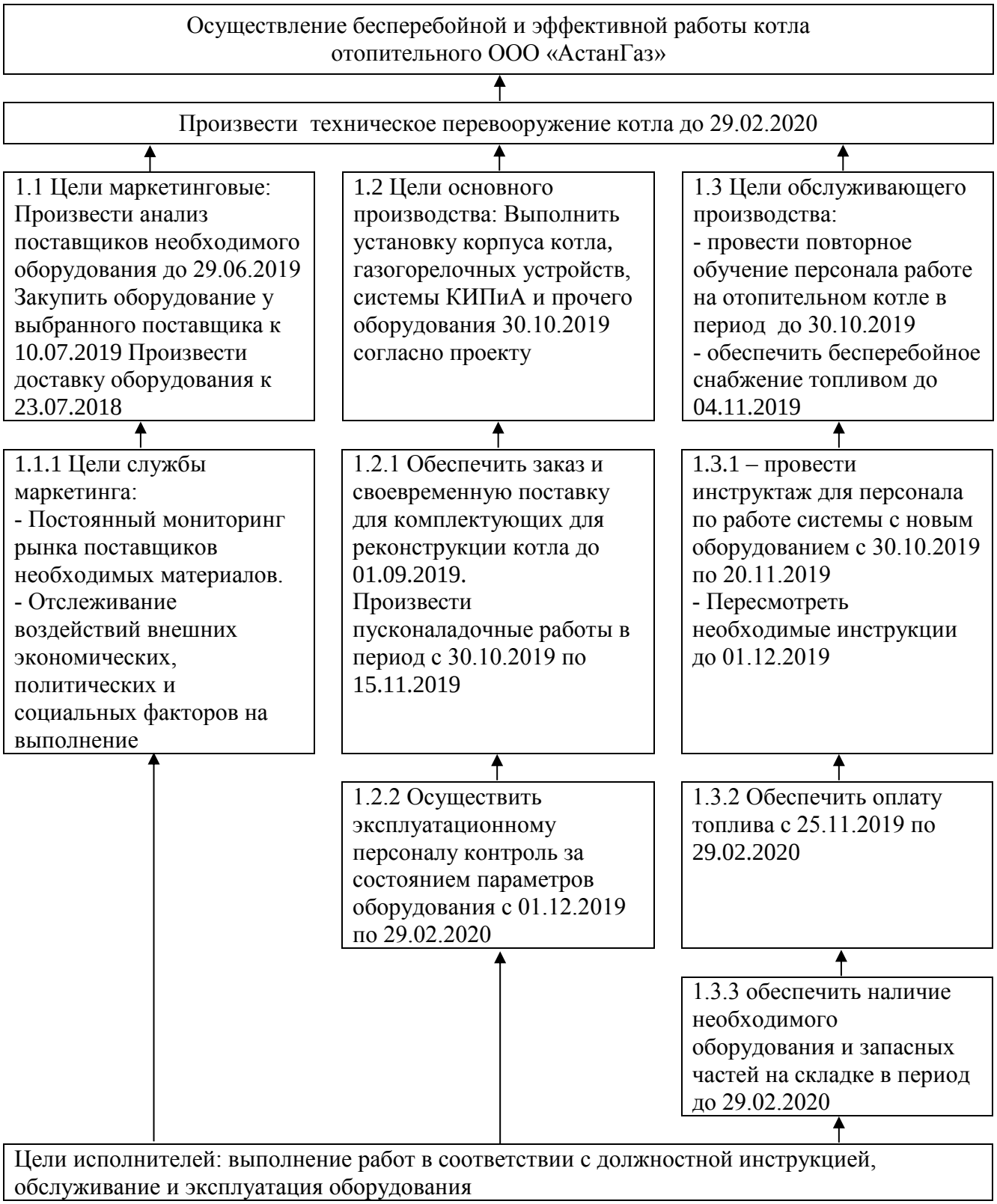


Рисунок 5.3 – Дерево целей проекта

Метод дерева целей ориентирован на получение относительно устойчивой структуры целей, проблем, направлений. Для достижения этого при построении его следует учитывать закономерности целеобразования и использовать принципы формирования иерархических структур [134-136].

Построение дерева целей начинается с постановки главной цели проекта. Каждую цель более высокого уровня можно представить, как самостоятельную систему, включающую в себя цели более низкого уровня (подцели) как ее элементы. При этом необходимо установить полный состав подцелей. Цель второго уровня может быть расчленена на цели третьего и последующих уровней.

Основная ценность построения дерева целей – отображение способа достижения главной цели через составление перечня понятных и достижимых целей нижнего уровня. После составления дерева целей должно быть ясно, каким образом можно достичь главной цели, в какие сроки – это должно произойти, и кто является ответственным за каждую из подцелей.

Признаком завершения построения дерева целей является формулировка таких целей, которые дальше не расчленяются и дают конечные результаты, определенные главной целью [133].

Диаграмма Ганта (также ленточная диаграмма, график Ганта) – это популярный тип столбчатых диаграмм (гистограмм), который используется для иллюстрации плана, графика работ по какому-либо проекту. Диаграмма Ганта является стандартом де-факто в теории и практике управления проектами, по крайней мере, для отображения структуры перечня работ по проекту.

Диаграмма Ганта представляет собой отрезки, размещенные на горизонтальной шкале времени. Каждый отрезок соответствует отдельному проекту, задаче или подзадаче. Проекты, задачи и подзадачи, составляющие план, размещаются по вертикали. Начало, конец и длина отрезка на шкале времени соответствуют началу, концу и длительности задачи [77, 100, 101, 103].

План-график Ганта по реализации цели представлен в таблице 5.6.

Таблица 5.6 – План-график Ганта по реализации цели

| Этап работы | Исполни-тель | Кол. исполнителей | 2019-2020 год | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Июнь | Июль | Июль | Август | Август | Сентябрь | Октябрь | Октябрь | Ноябрь | Декабрь | Январь | Февраль |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| Разработка проекта реконструкции, составление документации | ПТО | 5 | | | | | | | | | | | | |

Продолжение таблицы 5.6

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Экспертиза безопасности и утверждение проекта реконструкции | Экспертная организация | | | | | | | | | | | | | |
| Закупка материалов и оборудования для реконструкции | мастера | 2 | | | | | | | | | | | | |
| Подготовка старого оборудования к монтажу | Ремонтники, мастера | 8 | | | | | | | | | | | | |
| Выполнение монтажных работ по реконструкции | Ремонтники | 4 | | | | | | | | | | | | |
| Пуско-наладочные работы | Мастера | 3 | | | | | | | | | | | | |
| Пуск в эксплуатацию нового оборудования | Обслужи-вающий персонал | 8 | | | | | | | | | | | | |
| Сдача документации | Главный инженер | 1 | | | | | | | | | | | | |
| Диагностика оборудования | Начальник котельной | 5 | | | | | | | | | | | | |

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выполнен анализ существующих конструкций отечественных и зарубежных инжекционных газогорелочных устройств, для котлов малой мощности до 30 кВт.

2. Исследована работа и выявлены недостатки импортной конструкции газогорелочного устройства, устанавливаемого в котле «Protherm Klom».

3. Разработана конструкция усовершенствованного инжекционного взаимозаменяемого газогорелочного устройства для котлов малой мощности.

4. Обосновано на базе метода математического моделирования конструктивные особенности разработанного ГГУ:

– сегментный отвод переменного сечения, который обеспечивает выравнивание поля скорости газовоздушной смеси, поступающей в коллектор;

– коллектор со сложным профилем внутренней поверхности и форма огневых отверстий, обеспечивающие одинаковые скорости выхода газовоздушной смеси из огневых отверстий по всей длине коллектора (неравномерность скорости выхода не превышает 11 %);

– конструктивное исполнение огневого насадка и взаимное расположение огневых отверстий, что увеличивает площадь теплоотдачи, приводит к снижению высоты факела и сокращению зазора между горелкой и теплообменником.

5. Разработана математическая модель и доказана эффективность сжигания газа в топке котла типа «Protherm Klom» с газогорелочным устройством, предложенным автором.

6. Доказано на основании натурных исследований, что эффективность сжигания газа в котле типа «Protherm Klom» с разработанным ГГУ на 5 % выше, чем при компоновке котлоагрегата со штатным ГГУ.

7. По результатам натурных исследований работы котла типа «Protherm Klom» доказана достоверность использования математического моделирования для изучения процессов сжигания газа.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК


1 Авдолимов, Е.М. Промышленные тепловые сети [Текст] / Е.М. Авдолимов, А.П. Шальнов. - М.: Стройиздат, 2018.

2 Асатурян В.И. Постановка эксперимента [Текст]: учеб. пособие для вузов / В.И. Асатурян. - М.: Радио, 2017.

3 Ахмедов Р.Б. Дутьевые газовые горелки в промышленности[Текст] / Р.Б. Ахмедов. - М.: Недра, 2016.

4 Ахмедов Р.Б. Рациональное использование газа в энергетических установках [Текст]: Справочное руководство / Р.Б. Ахмедов, О.Н. Брюханов, А.С. Иссерлин и др. - Л.: Недра, 2018.

5 Ахмедов Р.Б. Сжигание газа на пищевых предприятиях. Газогорелочные устройства [Текст] / Р.Б. Ахмедов, Л.Н. Мироненкова. - М.: Недра, 2017.

6 Ахмедов Р.Б. Технология сжигания горючих газов и жидких топлив [Текст] / Р.Б. Ахмедов, Л.М. Цирульников. - Л.: Недра, 2018.

7 Березин В.Л. Капитальный ремонт магистральных трубопроводов [Текст] / В.Л. Березин, К.Е. Ращепкин, Л.Г. Телегин и др. - М.: Недра, 2017.

8 Битумное хозяйство [Электронный ресурс]: Оборудование для битумных баз. - Режим доступа: http://www.nombus.ru/product/bitumen.php, свободный.

9 Битумоварка с теплоизоляцией БВ-1,2 [Электронный ресурс]. - Режим доступа: http://www.tgn93.ru/krov/bv_l.2.htm, свободный.

10 Битумоварка электрическая БЭМТ-15/3 80-200 [Электронный ресурс]. - Режим доступа: http://www.bitumovarka.ru/modules.php?name=Html_Content, свободный.

11 Богомолов А.И. Газовые горелки инфракрасного излучения и их применение [Текст] / А.И. Богомолов, Д.Я. Вигдорчик, А.М. Маевский. - М.: Издательство литературы по строительству, 2016.

12 Бочков М.В. Химическая кинетика образования NO при горении метана в воздухе [Текст] / М.В. Бочков, Л.А. Ловачев, Б.Н. Четверушкин // Математическое моделирование. - 2018. - т. 4, № 9.

13 Брук Ю.Г. Сжигание газа в нагревательных печах [Текст] / Ю.Г. Брук. - Л.: Недра, 1977.

14 Бытовые газовые баллоны [Электронный ресурс]: каталог продукции Уралвагонзавод. - Режим доступа: http://www.prikamie.ru/uvz/, свободный.

15 Вабищевич П.Н. Численное моделирование [Текст] / П.Н. Вабищевич. - М.: Изд-во МГУ, 2018.

16 Вакс Л. Белорусская жилищно-коммунальная техника [Электронный ресурс] / Л. Вакс, А. Панасюк, В. Коннов, и др. - Режим доступа: http://www.nestor.minsk.by/sn/index.html, свободный.

17 Витальев В.П. Бесканальные прокладки тепловых сетей [Текст] / В.П. Витальев. - М.: Энергоатомиздат, 2019.

18 Водяные тепловые сети: Справочное пособие / Под ред. Н.К. Громова, Е.П. Шубина. – М.: Энергоатомиздат, 2016.

19 Волков М.А. Эксплуатация котельных установок на газообразном топливе [Текст] / М.А. Волков, Т.И. Коротеев, В.А. Волков. - М.: Стройиздат, 2018.

20 Волков М.И. Дорожно-строительные материалы [Текст] / М.И. Волков, В.О. Гельмер, Л.Ф. Засобин и др. - М.: Науч.-техн. изд. мин. автомобильного транспорта и шоссейных дорог РСФСР, 2017.

21 Волосевич П.П. Автомодельные решения задач газовой динамики с учетом теплопроводности [Текст] / П.П. Волосевич, Е.И. Леванов. - М.: Изд-во МФТИ, 2018.

22 Газовое оборудование, приборы и арматура [Текст]: справ, пособие / Под ред. Н.И. Рябцева. - М.: Недра, 2018.

23 Гелетуха Г.Г. Обзор технологий добычи и использования биогаза на свалках и полигонах твердых бытовых отходов и перспективы их развития в Украине [Текст] / Г.Г. Гелетуха, З.А. Марценюк: журн. «Экотехнологии и ресурсосбережение» - 2019, № 4, 2019.

24 Гелетуха Г.Г. Скважина в пригороде. Утилизация свалочного газа [Текст] / Г.Г. Гелетуха, Ю. Матвеев, К. Копейкин // журн. «Деньги и технологии» - 2020. № 4. - 2020.

25 Гибшман М.Е. Мосты и сооружения на автомобильных дорогах [Текст] / М.Е. Гибшман, И.Е. Дедух. - М.: Транспорт, 2018.

26 Глозштейн Я.С. Использование газа в промышленных печах [Текст] / Я.С. Глозштейн, Д.В. Карпов, JI.Н. Муромский и др. - JI.: Недра, 2016.

27 Гурвич А.М. Особенности моделирования газогорелочных устройств [Текст] / А.М. Гурвич, А.С. Иссерлин: журн. «Энергомашиностроение» - 2016, №2, 2016.

28 Гурвич В.И. Биогаз (БГ) полигонов ТБО - образование, распространение, обезвреживание [Текст] / В.И. Гурвич, А.Б. Лившиц, С.И. Прыгов, и др. // Экол. вестн. Подмосковья, 2019.

29 Гурвич В.И. Добыча и утилизация свалочного газа (СГ) - самостоятельная отрасль мировой индустрии [Электронный ресурс] / В.И. Гурвич, А.Б. Лифшиц. - Режим доступа: http://www.geopol.ru, свободный.

30 Гухман А.А. Применение теории подобия к исследованию процессов тепломассобмена [Текст] / А.А. Гухман. - М., «Высшая школа», 2019.

31 Двойнишников В.А. Конструкция и расчет котлов и котельных установок [Текст]: учебник для техн. по спец. «Котлостроение» / В.А. Двойнишников, Л.В. Деев, М.А. Изюмов. - М.: Машиностроение, 2018.

32 Джонс К. Использование биогаза мусорных свалок в качестве топлива для выработки электроэнергии [Текст] / К. Джонс, К.Э. Джиовандо: журн. «Мировая электроэнергетика» - 2019, № 4, 2019.

33 Джонсон Н. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке [Текст]: Методы планирования эксперимента / Н. Джонсон, Ф. Лион. - М.: Мир, 2019.

34 Дизенко Е.И. Противокоррозионная защита трубопроводов и резервуаров: учебник / Е.И. Дизенко, В.Ф. Новоселов, П.И. Тугунов и др. - М.: Недра, 2017.

35 Домбровинский С.П. Сжигающие устройства для эффективного сжигания

газа в промышленных печах и сушилах [Электронный ресурс] / С.П. Домбровинский, А.Т. Севягин. - Режим доступа: http://www.gazprompribor.ru/root/2004/oct/info.html, свободный.

36 Егерман Г.Ф. Ремонт магистральных газопроводов [Текст] / Г.Ф. Егерман, М.Д. Джафаров, Е.А. Никитенко. - М.: Недра, 2017.

37 Ефремова Т.В. Исследование и оптимизация системы сбора биогаза на полигонах твердых отходов в целях обеспечения экологической безопасности [Текст] - дисс. канд. техн. наук 05.23.03 / Ефремова Татьяна Васильевна. - Волгоград, 2015.

38 Зайдель А.Н. Ошибки измерения физических величин [Текст] / А.Н. Зайдель. - Д.: Наука, 2017.

39 Захаренко С.Е. Справочник строителя тепловых сетей [Текст] / С.Е. Захаренко, Ю.С. Захаренко, М.А. Пищиков. - М.: Энергия, 2016.

40 Защита металлических сооружений от коррозии [Текст]: справочник. - М.: Недра, 2018.

41 Зимин Г.Ф. Средства теплотехнических измерений [Текст] / Г.Ф. Зимин. - М.: Изд-во стандартов, 2018.

42 Иванов Ю.В. Газогорелочные устройства [Текст] / Ю.В. Иванов - Изд. 2-е, перераб. и доп. - М.: Недра, 2017.

43 Иванов Ю.В. Основы расчета и проектирования газовых горелок [Текст] / Ю.В. Иванов. -М.: Гостоптехиздат, 2016.

44 Иноземцев А.А. Битумно-минеральные материалы [Текст] / А.А. Иноземцев. - Д.: Стройиздат, Ленингр. отд., 2017.

45 Инструкция по защите городских подземных трубопроводов от коррозии [Текст]: РД 153-39.4-091-01. - М.: АКХ им. К.Д. Памфилова, 2018.

46 Инструкция по защите городских подземных трубопроводов от электрохимической коррозии [Текст]. - М.: Стройиздат, 2018.

47 Инструкция по нанесению покрытий на основе битумнополимерных мастик холодного отверждения для защиты от коррозии технологического оборудования и строительных конструкций [Текст]. - М.: ВНИПИТеплопроект, 2017.

48 Исламов М.Ш. Проектирование и эксплуатация промышленных печей [Текст] / М.Ш. Исламов. - Л.: Химия, 2016.

49 Иссерлин А.С. Газовые горелки [Текст] / А.С. Иссерлин. - Л.: Недра, 2017.

50 Иссерлин А.С. Исследование работы газогорелочных устройств на огневых моделях [Текст] / А.С. Иссерлин: сб. Теория и практика сжигания газа, вып. II. - Л.: Недра, 2016.

51 Иссерлин А.С. Основы сжигания газового топлива [Текст]: Справочное пособие / А.С. Иссерлин. - 2-е изд., перераб. и доп. - Л.: Недра, 2018.

52 Кассандрова О.Н. Обработка результатов наблюдений [Текст] / О.Н. Кассандрова, В.В. Лебедев. - М.: Наука, 2017.

53 Каталог продукции Борисогл. котельно-мех. завода [Электронный ресурс]. - Режим доступа: http://bkmz.pp.ru, свободный.

54 Кирпичев М.В. Теория подобия [Текст] / М.В. Кирпичев. - М.: Издательство

АН ТРСП, 2015.

55 Коган Р.А. Оборудование для ремонта трещин [Электронный ресурс]: Каталог-справочник «Дорожная Техника - 2019» / Р.А. Коган, О.Б. Гопин - Режим доступа: http://www.vvksnab.ru/1034, свободный.

56 Колесников А.Ф. Основы математической обработки результатов измерений [Текст] / А.Ф. Колесников. - Томск, 2016.

57 Комина Г.П. Утилизация газа метантенков в котельных очистных сооружений [Текст] / Г.П. Комина, Е.Е. Мариненко. // Сб. тез. докл. Всесоюзн. науч.-техн. совещ. «Повышение качества сжигания топлива и охрана окружающей среды от загрязнения вредных выбросов ТЭС и крупными предприятиями». - Л., 2018.

58 Комплект средств управления и безопасности для водогрейных и паровых котлов [Электронный ресурс]. - Режим доступа: http://bkmz.pp.ru/ _avtom.php.html#, свободный.

59 Костельов М.П. Современные методы и средства ямочного ремонта дорожных покрытий условиях [Электронный ресурс]: Каталог-справочник «Дорожная Техника - 2020» / М.П. Костельов. - Режим доступа: http://www.wksnab.ru/s/1034.html, свободный.

60 Костельов М.П. Устройство асфальтобетонных покрытий в неблагоприятных погодных условиях [Электронный ресурс]: Каталог - справочник «Дорожная Техника - 2020» / М.П. Костельов. - Режим доступа: http://www.vvksnab.ni/s/1034.html, свободный.

61 Котлы для разогревая материалов, битума, мастик... [Электронный ресурс]. - Режим доступа: http://at.lavazar.com/a-machines.htm, свободный.

62 Котлы напольные отопительные [Электронный ресурс]: Автоматика котловая и запасные части к ней. - Режим доступа: http://www.sandis.ru, свободный.

63 Краснощеков П.С. Принципы построения моделей [Текст] / П.С. Краснощеков, А.А. Петров. - М.: Изд-во МГУ, 2018.

64 Красовский Г.И. Планирование эксперимента [Текст] / Г.И. Красоврkий, Г.Ф. Филаретов. - Мн.: Изд. БГУ, 2018.

65 Крашенинников А.Н. Монолитная теплоизоляция из ячеистых бетонов и пластмасс [Текст] / А.Н. Крашенинников. - Л.: Стройиздат, 2017.

66 Кривоногов Б.М. Повышение эффективности сжигания газа и охрана окружающей среды [Текст] / Б.М. Кривоногов. - Л.: Недра, 2018.

67 Крутов В.И. Основы научных исследований [Текст]: учеб. для техн. вузов / В.И.Крутов, И.М. Грушко, В.В. Попов и др. - М.: Высшая школа, 2018.

68 Кузнецов В.А. Основы метрологии [Текст] / В.А. Кузнецов, Г.В. Ялунина. - М.: Изд. стандартов, 2019.

69 Кязимов К.Г. Устройство и обслуживание подземных газопроводов [Текст] / К.Г. Кязимов. -М.: Стройиздат, 2017.

70 Лавров Н.В. Процессы горения топлива и защита окружающей среды [Текст] / Н.В. Лавров, Э.И. Розенфельд, Г.П. Хаустович. - М.: Металлургия. 2018.

71 Латышев И.А. Асфальт - лидер повторного использования. Статья по мате-

риалам «Businesswire» [Электронный ресурс] / И.А. Латышев. - Режим доступа: http://www.nestor.minsk.by/sn/index.html, свободный.

72 Левин А.М. Принципы, рационального сжигания газа [Текст] / А.М. Левин. - Л.: Недра. 2018.

73 Мариненко Е.Е. Активная дегазация полигонов твердых бытовых отходов и энергетическая утилизация биогаза в битумоварочных агрегатах малой производительности [Текст] / Е.Е. Мариненко, А.В. Черкасов. - М.: 2016. - Деп. в ВИНИТИ Российской академии наук 06.02.2016, № 205-В2004.

74 Мариненко Е.Е. Биогаз и его рациональное использование в тепловых установках [Текст] - дисс. канд. техн. наук 05.23.03 / Мариненко Елена Егоровна. - Л.: 2018.

74 Мариненко Е.Е. Использование биогаза в коммунальном и сельском хозяйстве [Текст] / Е.Е. Мариненко // Новые технологии в жилищно-коммунальном хозяйстве: Сб. тез. докл. конгресса, май 2016 г. - СПб., 2016.

75 Мариненко Е.Е. Механизмы образования вредных примесей в продуктах сгорания биогаза и природного газа [Текст] / Е.Е. Мариненко // Информационный листок Волгоградского ЦНТИ. - Волгоград, 2018.

76 Мариненко Е.Е. Основы получения и использования биотоплива для решения вопросов энергосбережения и охраны окружающей среды в жилищно-коммунальном и сельском хозяйстве [Текст]: учебное пособие / Е.Е. Мариненко. - Волгоград, 2019.

77 Мариненко Е.Е. Система сбора, транспортировки и утилизации биогаза на полигонах твердых бытовых отходов [Текст] / Е.Е. Мариненко, Т.В. Ефремова, В. Черкасов // Информационный листок № 51-010-04 Волгоградского ЦНТИ. - Волгоград, 2016.

78 Мариненко Е.Е. Снижение выбросов вредных веществ при переоборудовании газогорелочных устройств инфракрасного излучение для сжигания биогаза [Текст] / Е.Е. Мариненко, П.П. Кондауров, А.В. Черкасов // III Международная научная конференция «Качество внутреннего воздуха и окружающей среды». - Волгоград, 2016.

79 Мариненко Е.Е. Тенденции развития систем сбора и обработки дренажных вод и метансодержащего газа на полигонах твердых бытовых отходов: отечествен, и зарубежный опыт [Текст] / Е.Е. Мариненко, Ю.Л. Беляева, Г.П. Комина. - СПб.: Недра, 2017.

80 Мариненко Е.Е. Теплоснабжение биогазовой установки [Текст] / Е.Е. Мариненко, Г.П. Комина, А.Л. Шкаровский // Совершенствование систем теплогазоснабжения и вентиляции: Межвуз. сб. тр. - Л., 2019.

81 Мариненко Е.Е. Экологические аспекты использования биогаза в России и за рубежом [Текст] / Е.Е. Мариненко, Г.П. Комина. - М.: ВНИИЭгазпром, 2019.

82 Мариненко Е.Е. Экологические характеристики сжигания биогаза и природного газа / Е.Е. Мариненко, Г.П. Комина. - М.: ВНИИЭгазпром, 2019.

83 Марышев Б. Оборудование для строительства современных дорог [Электронный ресурс]: Дорожная техника / Б. Марышев, Б. Соловьев. - Режим дос-

тупа: http://archive.expert.ru/oborud/00/04-00/4ogl.htm, свободный.

84 Медников Ю.П. Эксплуатация промышленных печей и сушил на газовом топливе [Текст] / Ю.П. Медников, Г.Д. Дымов, К.Н. Рейхерд. - Л.: Недра, 2018.

85 Мельников О.И. Справочник монтажника сетей теплогазоснабжения [Текст] / О.И. Мельников, В.Т. Ежов, Л.А. Бломштейн. - Л.: Стройиздат, 2016.

86 Михеев В.П. Сжигание природного газа [Текст] / В.П. Михеев, Ю.П. Медников. - Л.: Недра, 2018.

87 Модернизация асфальто-битумных заводов [Электронный ресурс]: панорама российских объектов с горелками \veishaupt. - Режим доступа: http://www.weishaupt.rU/export/weishaupt/ru/panorama/_index/8.html, свободный.

88 Монтгомери Д.К. Планирование эксперимента и анализ данных [Текст] / Д.К. Монтгомери. - Л.: Судостроение, 2018.

89 Нечаев Г.А. Новые способы изоляции теплопроводов подземной прокладки [Текст] / Г.А. Нечаев. - Л.: Энергия, 2017.

90 Никольский Ю.Е. Эмульсионная технология для дорог [Электронный ресурс]: Каталог-справочник «Дорожная Техника-2018» / Ю.Е. Никольский. - Режим доступа: http://www.vvksnab.rU/s/1034.html, свободный.

91 Оборудование для кровельных работ [Электронный ресурс]. - Режим доступа: http://www.visma94.ru, свободный.

92 Организация ямочного ремонта дорожного покрытия [Электронный ресурс]: Методические рекомендации, 2016. - Режим доступа: http://www.dist-cons.ru/modules/bmod/index.html, свободный.

93 Палеев И.И. О моделировании процессов горения газа [Текст] / И.И. Палеев, А.С. Иссерлин: журн. «Газовая промышленность» - 2017, №10, 2017.

94 Панюшева З.Ф. Наладка отопительных котлов, работающих на газе [Текст] / З.Ф. Панюшева, Е.Б. Столпнер. - Л.: Недра, 2017.

95 Пархоменко Д.М. Газовые горелки инфракрасного излучения [Текст]: Справ, пособие / Д.М. Пархоменко, А.П. Патаман, В.В. Иванов. - Донецк, 2017.

96 Пат. 2258535 Российская Федерация, МПК7 А 61 L 11/00, В 09 В 1/00. Устройство для извлечения биогаза для обезвреживания полигонов хранения твердых бытовых отходов [Текст] / Мариненко Е.Е., Ефремова Т.В., Черкасов А.В. и др.; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет» (ВолгГАСУ). - № 2003125540; заявл. 18.08.2018; опубл. 20.08.2018, Бюл. № 23.

97 Переверзев В.А. Справочник мастера тепловых сетей [Текст] / В.А. Переверзев, В.В. Шумов. – Л.: Энергоатомиздат, 2016.

98 Перегудов В.В. Тепловые процессы и установки технологии полимерных строительных материалов и изделий [Текст]: учебник для вузов / В.В. Перегудов. - М.: «Высшая школа», 2017.

99 Перфилов Е.В. Снижение антропогенного воздействия полигонов твердых бытовых отходов на воздушную среду [Текст] - дисс. ... канд. техн. наук 03.00.16 / Перфилов Евгений Владимирович. - Волгоград, 2016.

100 Планирование эксперимента [Электронный ресурс]. - Режим доступа: http://www.statsoft.ru/home/textbook/modules/stexdes.html, свободный.

101 Правдин Б.Н. Индустриальные способы изоляции теплопроводов [Текст] / Б.Н. Правдин. - Л: Энергия, 2017.

102 Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест [Текст]: ГН 2.1.6.1338-03. - М.: «Нефтяник», 2015.

103 Предложения Газаппарат-автоматика [Электронный ресурс]: каталог. - Режим доступа: http://www.binus.ru/monitor/org.php?id=1741 l&data=07.06.06, свободный.

104 Преображенский В.П. Теплотехнические измерения и приборы [Текст]: учебник для вузов по спец. «Автоматизация теплоэнергетических процессов» / В.П. Преображенский. - 3-е изд., перераб. - М.: «Энергия», 2018.

105 Приборы для научных исследований и автоматизации эксперимента [Текст]. - Л.: Наука, 2017.

106 Приборы и оборудование. Битумоварка [Электронный ресурс]: каталог Саратовского научн.-произв. центра «РОСДОРТЕХ». - Режим доступа: http://www.rdt.ru/equipment, свободный.

107 Равич М.Б. Газ и эффективность его использования в народном хозяйстве [Текст] / М.Б. Равич. - М.: Недра, 2016.

108 Равич М.Б. Топливо и эффективность его использования [Текст] / М.Б. Равич. - М.: Наука, 2017.

109 Равич М.Б. Упрощенная методика теплотехнических расчетов [Текст] / М.Б. Равич. - М.: Наука, 2016.

110 Рогинский О.Г. Состояние и перспективы производства газоиспользующего оборудования и горелочных устройств [Текст] / О.Г. Рогинский, В.П. Албул, Ф.Г. Гайнуллин. - М.: ВНИИЭгазпром, 2017.

111 Розенфельд Э.И. Повышение эффективности использования газообразного и жидкого топлива [Текст] / Э.И. Розенфельд // сб. «Итоги науки и техники», сер. «Теоретические основы теплотехники». - М.: ВИНИТИ, 2016.

112 Розенфельд Э.И. Сжигание газа и мазута с минимальным выбросом продуктов неполного сгорания [Текст] / Э.И. Розенфельд // сб. «Итоги науки и техники», сер. «Топливный баланс». - М.: ВИНИТИ, 2018.

113 Роль возобновляемых источников энергии в энергетической стратегии России [Электронный ресурс]. - Режим доступа: http://www.energystrategy.ru, свободный.

114 Роль возобновляемых источников энергии в энергетической стратегии / России [Электронный ресурс]. - Режим доступа: http://www.energystrategy.ru, свободный.

115 Росляков П.В. Расчет образования топливных оксидов азота при сжигании азотсодержащих топлив [Текст] / П.В. Росляков // журн. «Теплоэнергетика» - 2018, №1 - 2018.

116 Румшинский Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента

[Текст]: справочное руководство / Л.З. Румшинский. - М.: Наука, 2017.

117 Сафрончик В.И. Защита подземных трубопроводов антикоррозионными покрытиями [Текст] / В.И. Сафрончик. - Л: Стройиздат, Ленингр. отд., 2017.

118 Сборник методик по определению концентраций загрязняющих веществ в промышленных выбросах [Текст]. - Л.: Гидрометеоиздат. 2018.

119 Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике [Текст] / Л.И. Седов. - М.: Наука, 2018.

120 Селиванов М.Н. Качество измерений [Текст]: метрологическая справочная книга / М.Н. Селиванов, А.Э. Фридман, Ж.Ф. Кудряшова. - Л.: Лениздат, 2018.

121 Сигал И.Я. Защита воздушного бассейна при сжигании топлива [Текст] / И.Я. Сигал. - Л.: Недра, 2018.

122 Скугорова Л.П. Материалы для сооружения газонефтепроводов и хранилищ [Текст] / Л.П. Скугорова. - М.: Недра, 2017.

123 Слотин Ю.С. Композиционное планирование регрессионного эксперимента [Текст] / Ю.С. Слотин. - М.: Знание, 2017.

124 Сравнительные характеристики битумной мастики и асмола, применяемых для изоляции нефтепроводов [Электронный ресурс]. - Режим доступа: http://www.srcpoisk.ru/index.htm, свободный.

125 Стаскевич Н.Л. Справочник по газоснабжению и использованию газа [Текст] / Н.Л. Стаскевич, Г.Н. Северинец, Д.Я. Вигдорчик. - Л.: Недра, 2019.

126 Стаскевич Н.Л. Справочник по сжиженным углеводородным газам [Текст] / Н.Л. Стаскевич, Д.Я. Вигдорчик. - Л.: Недра, 2018.

127 Степанов Т.Л. Таблицы планов для моделей высоких порядков [Электронный ресурс] / Т.Л. Степанов - Режим доступа: http://www.uran.donetsk.ua/~masters/2005/kita/stepanov.htm, свободный.

128 Стрижевский И.В. Защита подземных трубопроводов от коррозии [Текст] / И.В. Стрижевский, М.А. Сурис. - М: Энергоиздат, 2018.

129 Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент [Текст]: Справочник. - М.: Энергоатомиздат, 2018.

130 Тепловая изоляция [Текст]: справочник строителя / Под ред. Г.Ф. Кузнецова. - М.: Стройиздат, 2018.

131 Теплофизические свойства веществ [Текст]: справочник / под ред. Н.Б. Варгафтика. - М: Госэнергоиздат, 2016.

132 Теплоэнергетика и теплотехника. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент [Текст]: справочник / Под ред. В.А. Григорьева, В.М. Зорина. - М.: Энергоиздат, 2016.

133 Технологии и материалы для кровельных и гидроизоляционных работ [Электронный ресурс]. - Режим доступа: http://www.infstroy.ru/psc_base/firmpages/r/rastro/index.htm, свободный.

134 Федоров Н.А. Техника и эффективность использования газа [Текст] / Н.А. Федоров. - М.: Недра, 2017.

135 Федоров Н.А. Техника и эффективность использования газа [Текст] / Н.А. Федоров. - М.: Недра, 2018.

136 Фенни Д. Введение в теорию планирования экспериментов [Текст]: перев. с англ./ Д. Фенни. - М.: Наука, 2017.

137 Функции планирования эксперимента [Электронный ресурс]. - Режим доступа: http://rrc.dgu.ru/res/matlab/statist/book2/index.html, свободный.

138 Хаванов П.А. Атмосферные газовые горелки автономных теплогенераторов [Электронный ресурс] / П.А. Хаванов. - Режим доступа: http://www.select.ru/support/articles.shtml, свободный.

139 Хзмаляи Д.М. Теория горения и топочные устройства [Текст] / Д.М. Хзмаляи, Я.А. Каган. - М.: Энергия, 2017.

140 Ходасевич Г.Б. Планирование эксперимента [Электронный ресурс] / Г.Б. Ходасевич. - Режим доступа: http://pds.sut.ru/pe.htm, свободный.

141 Худякова Т.С. Особенности структуры и свойств битумов, модифицированных полимерами. Каталог-справочник «Дорожная Техника - 2003» [Электронный ресурс] / Т.С. Худякова, А.Ф. Масюк, В.В. Калинин. - Режим доступа: http://www.wksnab.ni/s/l034.html, свободный.

142 Черкасов А.В. Методика определения оптимальных параметров работы битумоварочного агрегата на модели [Текст] / А.В. Черкасов // IX Региональная конференция молодых исследователей Волгоградской области. Направление №16 «Экология, охрана среды, строительство». - Волгоград, 2016.

143 Черкасов А.В. Обеспечение тепловых режимов автономной работы передвижных битумоплавильных агрегатов [Текст] / А.В. Черкасов // X Региональная конференция молодых исследователей Волгоградской области. Направление №16 «Архитектура, градостроительство, строительство и экологические проблемы». - Волгоград, 2018.

144 Черкасов А.В. Оценка экологического воздействия передвижных битумоплавильных агрегатов на окружающую среду [Текст] / А.В. Черкасов, Е.Е. Мариненко, Т.В. Ефремова // IV Международная научная конференция «Качество внутреннего воздуха и окружающей среды». - Волгоград, 2016.

145 Черкасов А.В. Утилизация биогаза в битумоварочных агрегатах малой производительности [Текст] / А.В. Черкасов // VIII Региональная конференция молодых исследователей Волгоградской области. Направление №16 «Экология, охрана среды, строительство». - Волгоград, 2017.

146 Эстеркин Р.И. Методы теплотехнических измерений при сжигании газа. [Текст]: Справочное руководство / Р.И. Эстеркин, А.С. Иссерлин, М.И. Певзнер. - Л.: Недра, 2017.

147 Эстеркин Р.И. Теплотехнические измерения при сжигании газового и жидкого топлива [Текст]: Справочное руководство / Р.И. Эстеркин, А.С. Иссерлин, М.И. Певзнер. - Л.: Недра, 2018.

148 Ярышев Н.А. Теоретические основы измерения нестационарных температур [Текст] / Н.А. Ярышев. - Л., «Энергия», 2019.

149 Тарифы стоимости газа Челябинской области [Электронный ресурс]. - Режим доступа: https://novatek74.ru/naselenie10/tarify174/roznichnye-tseny-na-prirodnyy-gaz.

150 Технические характеристики котла Protherm KLOM [Электронный ресурс]. - Режим доступа: https://www.protherm.ru/klientam/produkciya-protherm/klom-12608.html

151 Тарифы стоимости газа Челябинской области [Электронный ресурс]. – Режим доступа:
http://tarif74.ru/htmlpages/Show219/Tarifypotrebitelyam/Tarifynaelektricheskuyuenergiy_35

152 Перечень юридических документов ООО «АстанГаз» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://astangas.ru/awards

153 Постановление Правительства РФ от 14.05.2013 N 410 (ред. от 19.03.2020) "О мерах по обеспечению безопасности при использовании и содержании внутридомового и внутриквартирного газового оборудования" [Электронный ресурс]. – Режим доступа:
http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_146557/