

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет»
(Национальный исследовательский университет)
Политехнический институт ЮУрГУ
Факультет «Заочный»
Кафедра «ГиГПС»

ПРОЕКТ ПРОВЕРЕН

Рецензент, (должность)

_____ 2017 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой

_____ /Е.К. Спиридонов/

_____ 2017 г.

МОДЕРНИЗАЦИЯ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ
ГЕНЕРАЦИИ ТЕПЛА ЦИНКОВОЙ ПЕЧИ

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА К ДИПЛОМНОМУ ПРОЕКТУ
ЮУрГУ.151000.995.00

Консультант, (должность)

_____/_____/

_____ 2017 г.

Руководитель проекта, (должность)

_____ /С.Н. Редников/

_____ 2017 г.

Автор проекта студент группы ПЗ-557

_____ /А.Л. Бездетнов/

_____ 2017 г.

Нормоконтролер, (должность)

_____ /А.В. Подзерко/

_____ 2017 г.

Челябинск 2017 г.

АННОТАЦИЯ

Модернизация газодинамической системы генерации тепла цинковой печи – Челябинск: ЮУрГУ, ЗФ; 2017, 40 страниц, 8 иллюстраций, библиографический список – 7 наименований, 3 чертежа формата А1, 4 плаката формата А1.

Проект посвящен модернизации газодинамической системы генерации тепла цинковой печи. Расчетно-пояснительная записка содержит обоснование выбора конструктивной схемы и описание ее работы, основные расчеты конструктивных параметров, а также расчеты и графики основных характеристик.

					<i>ЮУрГУ.151000.995.00ПЗ</i>		
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>			
<i>Разраб.</i>		<i>Бездетнов</i>			<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>		<i>Редников С.Н.</i>				6	40
<i>Реценз.</i>					<i>ЮУрГУ Кафедра ГиГПС</i>		
<i>Н. Контр.</i>		<i>Подзерко А.В.</i>					
<i>Утв.</i>							

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	8
СПЕЦЧАСТЬ	9
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	10
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	11

					ЮУрГУ.151000.995.00ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		3

ВВЕДЕНИЕ

Назначение горелок

Горелочные устройства являются важнейшим элементом системы отопления любого теплового агрегата. Правильный выбор горелочного устройства, рациональная установка его на агрегате, соблюдение условий эксплуатации решающим образом влияют на эффективность и экономичность, а иногда на работоспособность всего агрегата. Цель данной работы сделать оптимальный выбор горелочных устройств и системы отопления при новом строительстве и реконструкции тепловых агрегатов. Горелочные устройства являются весьма универсальными и могут использоваться в тепловых агрегатах различных типов и при различных технологических процессах. Следует отметить, что работа собственно горелки во многом определяется конструкцией и работой ряда смежных узлов и элементов: горелочного туннеля, систем розжига и контроля факела, управления подачей топлива и окислителя, системы безопасности. Системой отопления печей является совокупность горелочных устройств или нагревателей, устройств для подачи топлива и воздуха для горения, эвакуации продуктов сгорания и утилизации их тепла. Цель разработки системы отопления печи — обеспечить осуществление теплового, температурного и аэродинамического режимов, необходимых для оптимального проведения технологического процесса, для которого предназначена печь, а также максимальную экономичность работы агрегата и удобство его эксплуатации. При модернизации газодинамической системы генерации тепла цинковой печи необходимо опираться на целый ряд исходных положений и специальных требований. При этом необходимо выбрать и рассчитать:

- тип, характеристику, число и расположение в печи горелочных устройств или нагревателей;

- характер движения продуктов сгорания или атмосфер контролируемого состава в рабочем пространстве печи и в случае необходимости устройства для организации циркуляции этих газовых сред;

					ЮУрГУ.151000.995.00ПЗ	Лист
						4
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

- способ подачи воздуха для горения и уборки продуктов сгорания, схемы разводки топлива и воздуха для горения;
- температуры подогрева топлива и воздуха для горения;
- тип, размеры и характеристику теплоутилизационных устройств (рекуператоров или регенераторов).

Решения всех этих вопросов тесно взаимосвязаны. Например, при применении инжекционных горелок необходима установка блочного керамического рекуператора для подогрева воздуха для горения. Это диктуется тем, что такой рекуператор имеет самое низкое сопротивление по воздушному пути и поэтому чрезмерного повышения давления газа перед горелкой не потребуется. В связи с этим система отопления печи может быть правильно сконструирована только при комплексном подходе к ее разработке. Одним из наиболее значительных факторов, определяющих выбор системы отопления печи, является проводимый в ней технологический процесс. При нагреве в атмосфере контролируемого состава необходимо применять радиационные трубы или электрические нагреватели сопротивления. Если технологией предусмотрена выдержка нагреваемого изделия при заданных температурах, то в печах непрерывного действия предусматриваются камеры выдержки. Система отопления этих камер должна компенсировать потери тепла и обеспечивать высокую равномерность нагрева. Необходимость работы при повышенных скоростях нагрева заставляет применять печи с высокой температурой рабочего пространства даже при умеренных температурах нагрева металла. Для обеспечения повышенных требований к равномерности нагрева заготовок перед прокаткой в проходных нагревательных печах используют отопление многочисленными сводовыми горелками. Системы отопления печей должны разрабатываться с учетом экономических факторов, в первую очередь с целью сокращения расходов топлива. Обязательным элементом системы отопления должны быть рекуператоры или регенераторы подогрева компонентов горения. На основании экономического анализа в ряде случаев может оказаться эффективным энерготехнологический агрегат, в котором печь объединяется с паропроизводящей установкой и рекуператором для подогрева

					ЮУрГУ.151000.995.00ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		5

воздуха. Следует стремиться к минимально необходимому коэффициенту расхода воздуха, сокращению подсосов в печь воздуха и выбивания из нее продуктов сгорания, а также устранению разбавления воздухом продуктов сгорания по тракту к теплоутилизационным устройствам.

					ЮУрГУ.151000.995.00ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		6

Принцип действия горелки

Для подготовки и осуществления сжигания топлива горелочное устройство выполняет следующие функции:

- подготавливает топливо и воздух для горения, придавая им требуемые направления и скорости движения (в некоторых случаях в горелке происходит предварительный подогрев газа или воздуха);

- подготавливает горючую смесь (смешивает газовое топливо и воздух или распыляет жидкое топливо и смешивает его с воздухом, в ряде случаев подогревает топливовоздушную смесь до температуры воспламенения и сжигает ее);

- стабилизирует горение;

- осуществляет подачу подготовленной горючей смеси или продуктов сгорания в рабочее пространство или топку.

В зависимости от типа устройства оно может предназначаться для выполнения только части перечисленных функций. Процесс сжигания топлива можно условно разделить на три основных стадии: смешение топлива с воздухом для горения, подогрев топливовоздушной смеси до температуры воспламенения и собственно процесс сжигания. Процесс сжигания, т. е. реакция окисления компонентов топлива кислородом воздуха, протекает практически мгновенно. Первые же две стадии требуют значительно большего времени. По этой причине организация смешения определяет весь процесс сжигания, характеристики факела, а следовательно, распределение температур в рабочем пространстве печи и соответствие его технологическим требованиям к агрегату. Тупиковые радиационные трубы типа ТРТ имеют диффузионную горелку улучшенного смешения и предназначены для работы на природном газе при положительном давлении внутри трубы.

					ЮУрГУ.151000.995.00ПЗ	Лист
						7
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Труба представляет собой корпус, выполненный из жаропрочной стали (излучающая труба), внутри которой размещены горелка, рекуператор и камера сгорания (жаровая труба). Конструкция трубы позволяет стабилизировать коэффициент расхода первичного воздуха и другие параметры на уровне, исключающем образование сажи и местные перегревы излучающей трубы и обеспечивающем надежность автоматического регулирования во всем диапазоне расхода газа при групповой работе труб. Труба работает следующим образом. Воздух, подводимый к радиационной трубе, нагревается в трехоборотном рекуператоре, встроенном в излучающую трубу. Природный газ подают через центральную трубу, оканчивающуюся горелкой. Часть горячего воздуха подсасывается к газовому соплу через отверстия в горелочном патрубке, а остальной воздух подается к выходному сечению горелки. Газовоздушная смесь сгорает внутри жаровой трубы и поступает к излучающей трубе частично через цилиндрические отверстия.

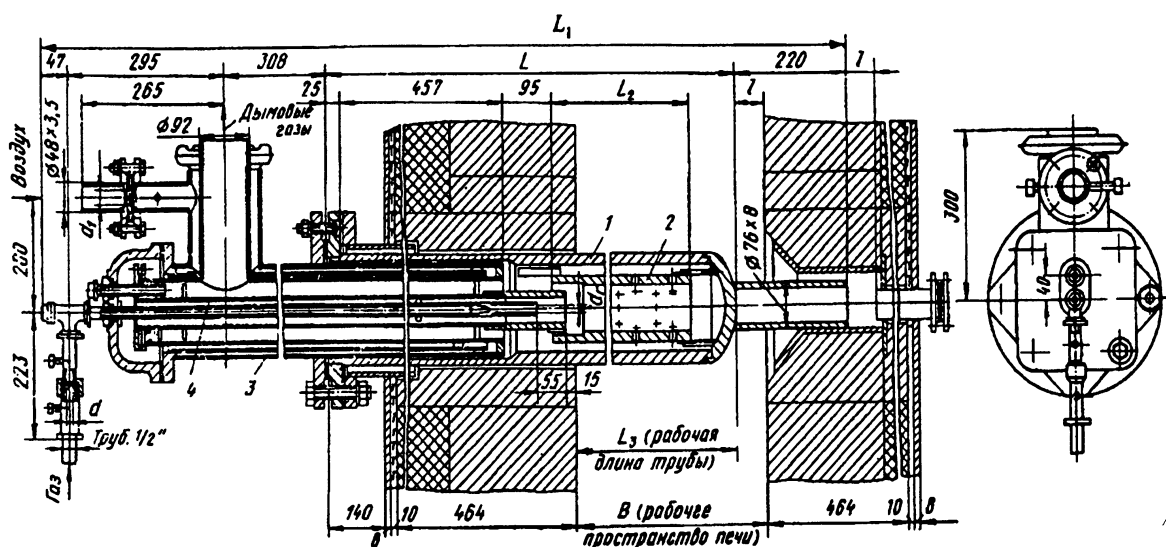


Рис. 1. Тупиковые радиационные трубы типа ТРТ: 1 — излучающая труба; 2 — жаровая труба; 3 — рекуператор; 4 — горелка

Рассекатель

Рассекатель предназначен для стабилизации пламени, недопущения отрыва фронта горения от выходного среза горелки. Материал рассекателя SiC

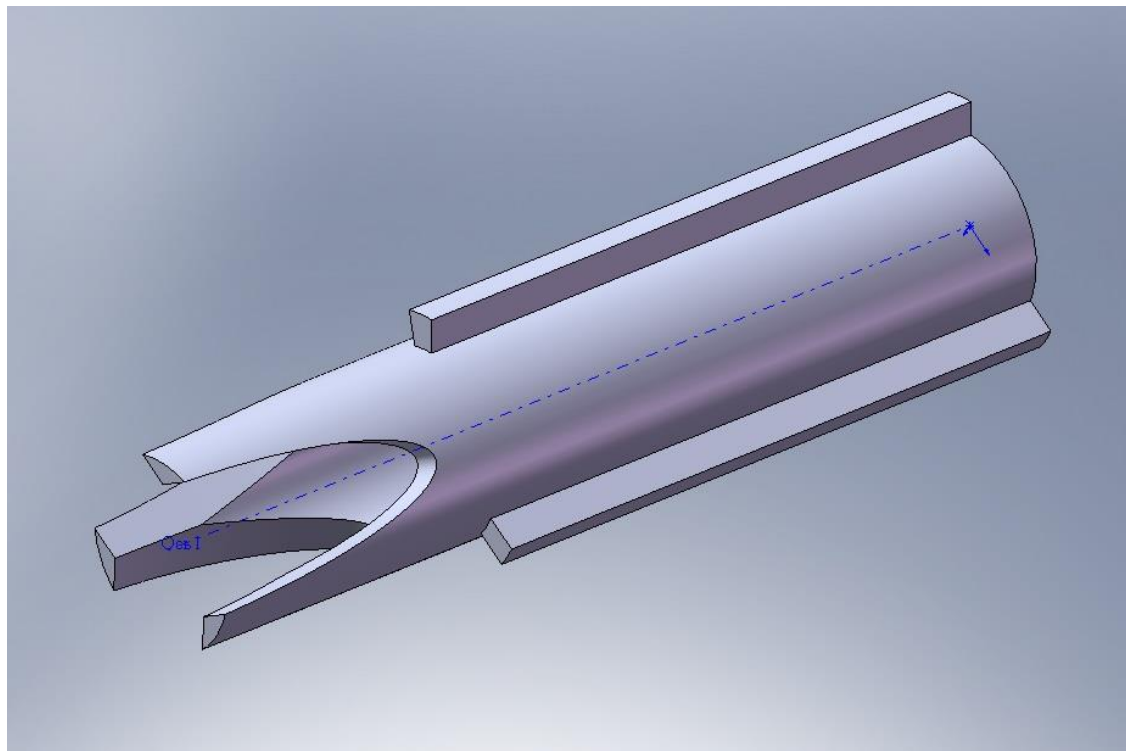


Рис. 2. Рассекатель

Высокая скорость выпуска газов сгорания создает давление на выходе из трубки керамической горелки, что приводит к рециркуляции дымовых газов. Это приводит к сокращению выбросов NO_x и к равномерности температуре излучающей трубки. Горячие дымовые газы поступают через керамический теплообменник, нагревая дополнительный холодный воздух для горения. Максимальная достижимая температура предварительного подогрева воздуха составляет ок. 400°C . Внутренняя газопламенная труба должна быть установлена в одноконтурной излучающей трубке для направления горячих дымовых газов. Если металлические несимметричные излучающие трубки установлены горизонтально, то необходимо предусмотреть поворот трубки на 180 градусов для продления ее срока службы. Поскольку горелка VICR является тонкой и компактной, она также может быть использовалась в лучистых трубах, которые ранее были электрически нагреты.

Конструкция

					ЮУрГУ.151000.995.00ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		9

Горелка ВІСR состоит из трех модулей: горелка, камера сгорания с теплообменником и корпус для выхлопных газов. Эта структура позволяет легко настроить соответствующий процесс или интегрировать в существующие системы. Сокращается время обслуживания и ремонта, а существующие печи могут быть легко преобразованы.

Горелка

Горелка ВІСR содержит соединительный фланец для газа, кожух для воздуха горелки и комплектную горелку с сопловым смешиванием с электродами зажигания и ионизации. Воздушная направляющая труба стабилизирует поток холодного воздуха к головке горелки. Давление газа и воздуха можно легко измерить с помощью газовых и воздушных измерительных ниппелей. На этапе строительства Е в газовом контуре встроены измерительная диафрагма и регулировка расхода. Различные габаритные длины обеспечивают точную настройку системных требований.

Камера сгорания с теплообменником

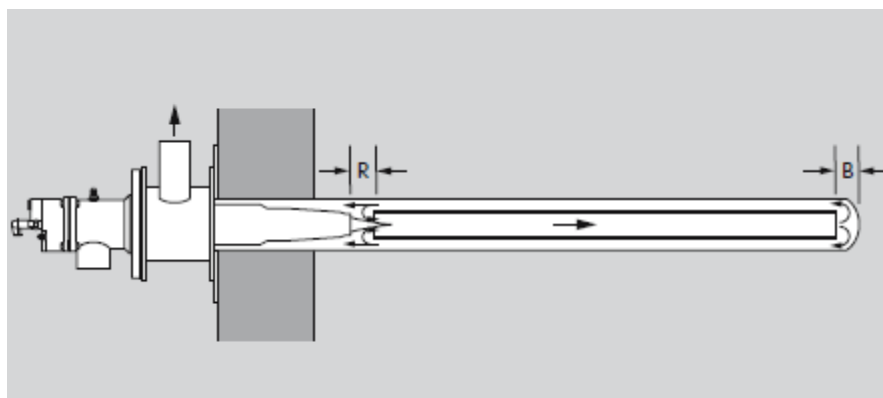
Горелка ВІСR содержит соединительный фланец для газа, кожух для воздуха горелки и комплектную горелку с сопловым смешиванием с электродами зажигания и ионизации. Воздушная направляющая труба стабилизирует поток холодного воздуха к головке горелки. Давление газа и воздуха можно легко измерить с помощью газовых и воздушных измерительных ниппелей. На этапе строительства Е в газовом контуре встроены измерительная диафрагма и регулировка расхода. Различные габаритные длины обеспечивают точную настройку системных требований.

Принцип действия

Блок управления горелкой открывает газовые и воздушные электромагнитные клапаны. Газ проходит через соединительный фланец газа, и воздух проходит через воздушный корпус в камеру сгорания до головки горелки сопел. Горелка непосредственно воспламеняется. Высокая скорость выпуска газов сгорания создает давление на выходе из трубки керамической горелки, что приводит к рециркуляции дымовых газов. Выбросы NOx снижаются. Радиационная труба

					ЮУрГУ.151000.995.00ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		10

излучает ровную температуру. Горячие дымовые газы поступают через керамический теплообменник в корпус выхлопного газа, нагревая дополнительный холодный воздух для горения до 400°C. Газы сгорания выпускаются через корпус выхлопных газов.



При проектировании горелки, которая должна быть объединена с излучающей трубкой, необходимо обратить внимание на пропускную способность и скорость теплопередачи используемого материала. Если рекуперативная горелка BICR установлена в горизонтальной металлической излучающей трубке, необходимо предусмотреть возможность поворота трубки. Временные интервалы для течения металлических излучающих трубок зависят от температуры печи и теплового напряжения излучающей трубки.

Теоретические основы

Скорость химической реакции зависит от температуры газовой смеси, в которой она происходит, увеличиваясь экспоненциально вместе с ней. В силу высокой экзотермичности реакции окисления углеводородов эта зависимость очень сильная. Горение газовой смеси непременно сопровождается также и движением газа. Другими словами, процесс горения представляет собой, отвлекаясь от его химической стороны, также и газодинамический процесс. В общем случае для определения режима горения необходимо совместное решение системы уравнений, включающей в себя как уравнения химической кинетики данной реакции, так и уравнения движения газовой смеси.

Положение, однако, существенно упрощается тем, что характерные размеры, определяющие условия данной конкретной задачи, достаточно велики. В таком случае чисто газодинамическая задача может быть отделена от задачи химической кинетики.

Область сгоревшего газа (т. е. область, в которой реакция уже закончилась и газ представляет собой смесь продуктов горения) отделена от газа, в котором горение еще не началось, некоторым переходным слоем, где как раз и происходит самая реакция (зона горения или пламя); с течением времени этот слой передвигается вперед со скоростью, которую можно назвать скоростью распространения горения в газе. Величина скорости распространения зависит от интенсивности теплопередачи из зоны горения в ненагретую исходную газовую смесь, причем основной механизм теплопередачи состоит в обычной теплопроводности.

Порядок величины ширины зоны горения δ определяется средним расстоянием, на которое успевает распространиться выделяющееся в реакции тепло за то время τ , в течение которого длится эта реакция (в данном участке газа). Время есть величина, характерная для данной реакции, и зависит лишь от термодинамического состояния горящего газа (но не от характеристических параметров задачи). Если χ — температуропроводность газа, то $\delta \sim \sqrt{\chi\tau}$.

					ЮУрГУ.151000.995.00ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		12

При определении движения газа можно пренебречь толщиной зоны горения и рассматривать ее просто как поверхность, разделяющую продукты горения и несгоревший газ. На этой поверхности (фронт пламени) состояние газа испытывает скачок, т. е. она представляет собой своеобразную поверхность разрыва.

Скорость перемещения этого разрыва относительно самого газа (в нормальном к фронту направлении) называют нормальной скоростью пламени. За время τ горение успевает распространиться на расстояние порядка величины δ ; поэтому искомая скорость пламени: $v_1 \sim \delta/\tau \sim \sqrt{\chi/\tau}$

На поверхности разрыва, заменяющего собой зону горения, как и на всяком вообще разрыве, должны выполняться условия непрерывности потоков вещества, импульса и энергии. Первое из этих условий, как обычно, определяет отношение нормальных к поверхности разрыва компонент скорости газа относительно разрыва: $\rho_1 v_1 = \rho_2 v_2$.

Благодаря малости нормальной скорости распространения пламени по сравнению со скоростью звука условие непрерывности потока импульса сводится к непрерывности давления, а потока энергии — к непрерывности тепловой функции. При использовании этих условий следует помнить, что газы по обе стороны рассматриваемого разрыва химически различны, а потому их термодинамические величины не являются одинаковыми функциями друг от друга. Считая газ политропным, имеем:

$$p_1 = p_2$$

$$T_2 = \frac{q}{c_{p2}} + \frac{c_{p1}}{c_{p2}} T_1$$

$$V_2 = V_1 \frac{\gamma_1(\gamma_2 - 1)}{\gamma_2(\gamma_1 - 1)} \left(\frac{q}{c_{p1} T_1} + 1 \right)$$

Благодаря малости скорости движения газа по сравнению со скоростью звука, при исследовании устойчивости фронта пламени можно рассматривать газ как несжимаемую идеальную (невязкую) среду, причем нормальная скорость распространения пламени предполагается заданной постоянной величиной. Такое

исследование приводит к результату о неустойчивости фронта. В таком виде это исследование относится лишь к достаточно большим значениям чисел Рейнольдса. Учет вязкости газа, однако, в данных условиях сам по себе не может привести к очень большому критическому значению этих чисел.

Такая неустойчивость должна была бы приводить к самопроизвольной турбулизации пламени. Между тем экспериментальные данные свидетельствуют о том, что самопроизвольная турбулизация пламени фактически не происходит, — во всяком случае вплоть до очень больших значений числа Рейнольдса. Это связано с наличием в реальных условиях ряда факторов (гидродинамических и диффузионно-тепловых), стабилизирующих пламя.

Существенную роль в качестве такого источника может играть влияние искривления фронта на скорость горения. Если учитывать только теплопроводность, то на вогнутых (по отношению к исходной горючей смеси) участках фронта скорость повышается (благодаря улучшению условий теплопередачи в охватываемую вогнутостью свежую смесь), а на выпуклых местах уменьшается; этот эффект стремится выровнять фронт, т. е. влияет в стабилизирующем направлении. Изменение же диффузионного режима, как это следует из аналогичных соображений, оказывает дестабилизирующее действие. Таким образом, общий знак эффекта зависит от соотношения между коэффициентами температуропроводности и диффузии.

Распространяющееся по горючей смеси пламя приводит в движение окружающий газ на значительном протяжении. Неизбежность возникновения сопутствующего горению движения видна уже из того, что ввиду различия между скоростями продукты горения должны двигаться относительно несгоревшего газа с некоторой скоростью. В ряде случаев это движение приводит также и к возникновению ударных волн. Они не имеют непосредственного отношения к процессу горения, и их возникновение связано с невозможностью удовлетворить иным образом необходимым граничным условиям.

$$\nabla \vec{v} = 0$$

					ЮУрГУ.151000.995.00ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		14

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v}\nabla)\vec{v} = -\frac{1}{\rho}\nabla p + \mu\Delta\vec{v}$$

В цилиндрических координатах:

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_\varphi}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \varphi} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} - \frac{v_\varphi^2}{r} &= \\ &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \mu \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_r}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_r}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} - \frac{v_r}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} \right) \\ \frac{\partial v_\varphi}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_\varphi}{\partial r} + \frac{v_\varphi}{r} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} + v_z \frac{\partial v_\varphi}{\partial z} - \frac{v_r v_\varphi}{r} &= \\ &= -\frac{1}{\rho r} \frac{\partial p}{\partial \varphi} + \mu \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_\varphi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_\varphi}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 v_\varphi}{\partial z^2} - \frac{v_\varphi}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_r}{\partial \varphi} \right) \\ \frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{v_\varphi}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \varphi} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_z}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) \\ \frac{1}{r} \frac{\partial (r v_r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{\partial v_z}{\partial z} &= 0 \end{aligned}$$

$$(\vec{v}\nabla)f = v_r \frac{\partial f}{\partial r} + \frac{v_\varphi}{r} \frac{\partial f}{\partial \varphi} + v_z \frac{\partial f}{\partial z}$$

$$\Delta f = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial f}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 f}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial z^2}$$

Уравнения Навье–Стокса вязкого теплопроводного газа широко используются при решении различных классов задач. В силу нелинейности исходных уравнений их решения характеризуются, как правило, наличием подобластей больших градиентов и других особенностей типа пограничных слоев, висячих скачков, отрывных зон и т. д., что накладывает жесткие требования на применяемые численные алгоритмы. Эти алгоритмы должны обладать необходимой точностью, иметь достаточный запас устойчивости, удовлетворять свойствам консервативности и экономичности с возможностью получения решения задачи за разумное время на существующих ЭВМ. При решении уравнений Навье–Стокса использование явных схем неэффективно в силу жестких ограничений на соотношение временного и пространственных шагов расчетной сетки, особенно

при нахождении стационарного решения методом установления, поэтому наиболее часто используются неявные разностные схемы, безусловно устойчивые или имеющие более слабые ограничения на устойчивость.

Для создания модели горения необходимо соединить в единое целое методы и представления, сложившиеся в двух существенно различающихся областях науки газовой динамики и кинетике химических реакций. Чтобы решить эту задачу, прежде всего необходимо установить, какие характеристики потока газа представляют главный интерес для модели процесса горения. Толщина зоны осуществления процессов химического превращения много меньше характерного размера задачи. При ламинарном горении однородной стехиометрической метано-воздушной смеси в нормальных условиях толщина зоны реакции меньше 0,5 мм. Кроме того, при горении происходит сильное изменение температуры, а скорости химических реакций сильно зависят от температуры. Это обстоятельство также приводит к тому, что химические реакции локализуются в узких зонах.

На основе указанной особенности в теории ламинарного горения разработаны методы, позволяющие существенно упростить описание явления. В самом деле, зону химических реакций можно рассматривать как некоторый пограничный слой. Тогда решение этой внутренней задачи (т.е. распределения концентраций и температуры в зоне реакций) находится с помощью сравнительно простых методов, поскольку в уравнениях диффузии и теплопроводности перенос тепла и вещества вдоль фронта пламени несуществен, и, следовательно, достаточно проинтегрировать систему обыкновенных дифференциальных уравнений. При решении внешней задачи химические реакции можно не учитывать, а сращивание внутреннего и внешнего решений позволяет определить положение фронта пламени.

Для иллюстрации сказанного приведем два характерных примера — ламинарное горение неперемешанных газов (диффузионное горение) и горение однородной смеси. В первом случае используется решение Бурке - Шумана, а именно вводится так называемая восстановленная концентрация горючего $z =$

					ЮУрГУ.151000.995.00ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		16

$(S \cdot c_f - c_o + 1)/(S + 1)$, где S - стехиометрический коэффициент (показывающий, сколько граммов окислителя необходимо для полного сгорания одного грамма топлива), c - массовая концентрация, индексы f и o относятся к горючему и окислителю соответственно. Введенную величину можно интерпретировать как концентрацию атомов горючего во всех образовавшихся химических соединениях. Следовательно, химические реакции явно не влияют на ее распределение и последнее находится из решения уравнения диффузии без источников. Поскольку химическая реакция идет с большой скоростью, то во фронте пламени концентрации горючего и окислителя одновременно близки к нулю, т.е. фронт пламени в первом приближении есть поверхность, на которой выполняется условие $z = z_s = 1/(S + 1)$. Исследование внутренней структуры фронта пламени при диффузионном горении проведено Зельдовичем в предположении о том, что химическая реакция является одноступенчатой и необратимой. Это исследование сводится к решению одного обыкновенного дифференциального уравнения с нелинейным источником.

Другим примером служит ламинарное горение однородной смеси. Решение этой задачи получено Зельдовичем и Франк-Каменецким в работах которых проанализировано распространение нормального (плоского) фронта пламени. В пламени выделяются две зоны. В первой (тепловой) химические реакции несущественны. В ней вследствие конвекции и теплопроводности происходит прогрев смеси. Во второй зоне (зоне химических реакций) происходит превращение веществ. Конвекция в этой зоне несущественна, а отвод тепла определяется лишь теплопроводностью. Существенно, что толщина зоны химических реакций во много раз меньше толщины тепловой зоны. Поэтому зону реакций можно рассматривать как некоторую поверхность, на которой выполняются определенные граничные условия. Первое условие очевидно: температура равна температуре термодинамически равновесных продуктов сгорания. Второе условие связывает скачок производной от температуры по нормали к зоне реакции со скоростью химической реакции и коэффициентами

молекулярного переноса (существование такого скачка следует из того, что тепловыделение сосредоточено на поверхности).

Метод Зельдовича и Франк-Каменецкого можно использовать и для описания горения однородной смеси в общем случае. Для этого следует решить уравнение теплопроводности без источников с двумя граничными условиями: 1) на поверхности фронта пламени температура равна температуре продуктов сгорания и 2) на бесконечном удалении от фронта пламени температура равна температуре свежей смеси. Еще одно граничное условие для скачка производной от температуры по нормали к зоне реакций определяет положение фронта пламени.

В ряде случаев решение может быть еще более упрощено, так как не только толщина зоны реакций, но и тепловая толщина фронта пламени зачастую мала по сравнению с характерным размером задачи (как уже отмечалось, при горении однородной смеси пропана с воздухом в нормальных условиях основное изменение температуры происходит на расстоянии меньше миллиметра). Поэтому фронт пламени можно рассматривать как поверхность, на которой происходит скачкообразное изменение скорости, плотности, концентраций и температуры. Скорость движения этой поверхности относительно свежей смеси является некоторой физико-химической постоянной, обычно называемой нормальной скоростью распространения u_n . Таким образом, определение положения фронта пламени сводится к решению чисто кинематической задачи: найти поверхность, каждая точка которой движется со скоростью $\vec{u} + u_n \vec{n}$ (\vec{u} - скорость свежей смеси, \vec{n} - единичная нормаль к фронту пламени).

Из вышеизложенного следует, что в ламинарном потоке как при горении заранее не перемешанных газов, так и при горении однородной смеси положение фронта пламени можно определить, не рассматривая деталей химической кинетики.

Указанные выше методы можно использовать как при анализе турбулентного горения однородной смеси, так и при исследовании турбулентного диффузионного горения. В настоящее время нет больших сомнений в том, что при турбулентном диффузионном горении зону реакций можно считать тонкой

					ЮУрГУ.151000.995.00ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		18

(здесь и далее зона реакций определяется по неосредненным распределениям температуры и концентраций). Что же касается, турбулентного горения однородной смеси, то известные экспериментальные данные (хотя в настоящее время и весьма немногочисленные) также свидетельствуют о том, что в большинстве случаев толщина зоны реакций мала по сравнению с характерным размером задачи.

Таким образом, исследование турбулентного горения можно провести в два этапа. На первом этапе изучается внутренняя структура зоны реакций. Эта структура определяется только локальными характеристиками турбулентности. Например, если толщина зоны реакций много меньше, чем минимальный пространственный масштаб пульсаций скорости, то в окрестности зоны реакций можно принять, что скорость среды и восстановленная концентрация горючего меняются линейно. Такой подход уже использовался в теории горения однородной смеси. На втором этапе исследуются крупномасштабные колебания зоны реакций, которые приводят к ее перемещениям как целого. В этом случае основной интерес представляют амплитудные характеристики колебаний, так как они определяют среднюю протяженность зоны горения. На этом этапе детали химической кинетики не имеют особого значения.

Чтобы сформулировать, какие параметры турбулентности и какие методы исследования необходимо использовать на каждом из указанных этапов, рассмотрим основные особенности турбулентных течений и вытекающие из этих особенностей направления в теории турбулентности. Сейчас в этой теории можно выделить два основных подхода. Целью первого (традиционного) является нахождение различных статистических характеристик. Второй возник сравнительно недавно в связи с появлением мощных ЭВМ и основан на численном интегрировании уравнений Навье - Стокса, т.е. на выяснении более или менее детальной картины течения. К этому направлению относятся и исследования так называемых когерентных структур, т.е. неслучайных или не вполне случайных крупномасштабных колебаний скорости.

Выбор правильного подхода должен основываться на главной особенности турбулентности, которая обусловлена многомасштабностью характеристик течения.

Для пояснения напомним, что любое сложное пространственное распределение скорости можно представить в виде суперпозиции гармонических колебаний. В турбулентных потоках длина волны крупномасштабных колебаний сопоставима с характерным линейным размером задачи. Длина волны наиболее мелкомасштабных колебаний намного меньше характерного размера задачи и, что самое главное, уменьшается по мере роста числа Рейнольдса. Поэтому в рассматриваемой суперпозиции (т.е. в спектре турбулентности) представлено очень большое число колебаний, длины волн которых сильно варьируются. Крупномасштабные колебания определяют энергию турбулентности, а мелкомасштабные - ее диссипацию, которая оказывается существенной при всех числах Рейнольдса (т.е. при любой сколь угодно малой вязкости).

Последнее обстоятельство заслуживает особого внимания. Из общих соображений ясно, что крупномасштабные колебания скорости практически не зависят от вязкости, так как числа Рейнольдса для них обычно очень велики. Такие колебания, однако, неустойчивы, в результате чего образуются колебания с меньшим пространственным масштабом и несколько меньшим числом Рейнольдса. Этот процесс продолжается, пока не появятся колебания со столь малым пространственным масштабом, что их числа Рейнольдса будут порядка единицы. Эти колебания устойчивы из-за сильного влияния вязкой диссипации. Следовательно, с уменьшением вязкости наименьший пространственный масштаб колебаний падает, что приводит к увеличению градиента скорости, и поэтому в среднем диссипация энергии остается неизменной.

Из описанной картины вытекает, что многомасштабность процессов турбулентного переноса приводит к автомодельности турбулентных течений по числу Рейнольдса. Выражаясь точно, это означает, что средние значения всех величин, определяемых крупномасштабными колебаниями скорости, не зависят от числа Рейнольдса, если это число стремится к бесконечности. К таким

величинам относятся, например, скорость, давление или концентрация инертной примеси, а также различные степени этих величин.

Принцип автомодельности по числу Рейнольдса, вообще говоря, неприменим к описанию градиентов гидродинамических параметров, поскольку эти градиенты определяются мелкомасштабными колебаниями скорости. Справедливость рассматриваемого принципа хорошо подтверждена экспериментально и в настоящее время не вызывает особых сомнений.

Из сказанного следует ряд важных выводов. Прежде всего ясно, что описание одних только энергосодержащих, крупномасштабных колебаний скорости не может быть замкнутым. В самом деле, эволюция таких колебаний определяется вязкой диссипацией, зависящей от мелкомасштабных пульсаций. Более того, поскольку энергетический спектр пульсаций непрерывен, крупно- и мелкомасштабные колебания не могут рассматриваться изолированно, подобно тому, как в теории ламинарного движения сплошной среды рассматриваются макроскопические и молекулярные движения. Поэтому возможны только два пути создания теории турбулентности. На первом рассматриваются характеристики колебаний всех масштабов. При этом учет вязких эффектов обязателен и, следовательно, в такой теории должен фигурировать коэффициент кинематической вязкости. Рассматриваемый путь, однако, связан с анализом в известном смысле излишней информации, так как основные черты турбулентности не зависят от числа Рейнольдса.

Поэтому более естествен второй путь, основанный на поиске универсальных связей между характеристиками мелко- и крупномасштабных пульсаций. Как ясно из теории Колмогорова и Обухова, такие связи действительно существуют, если характерные масштабы колебаний, определяющих энергию турбулентности и ее диссипацию, сильно различны. Эти связи являются следствием принципа автомодельности турбулентности по числу Рейнольдса.

Строго говоря, такой подход предполагает рассмотрение предела решений уравнений Навье - Стокса при $Re \rightarrow \infty$. В этом случае возникает трудность, для пояснения которой обратимся к известному из квантовой механики рассуждению,

					ЮУрГУ.151000.995.00ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		21

иллюстрирующему необходимость статистического описания проблемы. Следуя идеям квантовой механики, рассмотрим, возможно ли измерение какой-либо величины (в том числе и диссипации энергии) при $Re \rightarrow \infty$. Под термином "измерение" естественно понимать не только собственно измерение с помощью какого-либо физического прибора, но и численное решение уравнений Навье - Стокса.

Ясно, что в любом опыте или численном решении уравнений Навье - Стокса определяются лишь величины, осредненные по некоторой пространственно-временной области (такие величины удобно назвать частично осредненными). Если число Рейнольдса стремится к бесконечности, то проблема измерения (или численного расчета) становится особенно важной, поскольку пространственные масштабы колебаний скорости, определяющих диссипацию, стремятся к нулю. Очевидно, что теория имеет объективное значение, только если в ней рассматриваются величины, имеющие предел при стремлении к нулю размера области, по которой производится осреднение (в противном случае разные измерительные приборы или разные численные алгоритмы будут давать несовпадающие между собой результаты). Таким образом, необходимо проанализировать двойной предельный переход, когда, с одной стороны, число Рейнольдса стремится к бесконечности, а с другой — размер области l , по которой производится осреднение, приближается к нулю. С практической точки зрения это означает, что производится серия опытов, в которых варьируются величины l и Re , а затем результаты измерений экстраполируются в область $l = 0, Re \rightarrow \infty$.

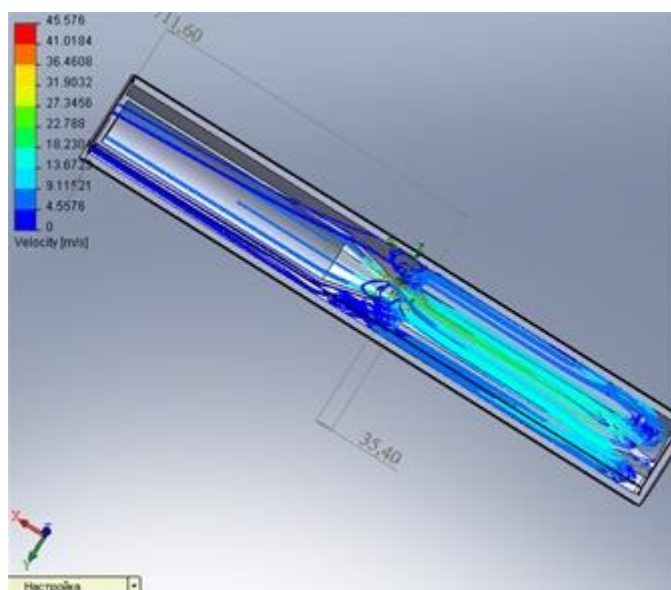
					ЮУрГУ.151000.995.00ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		22

Выбор САПР

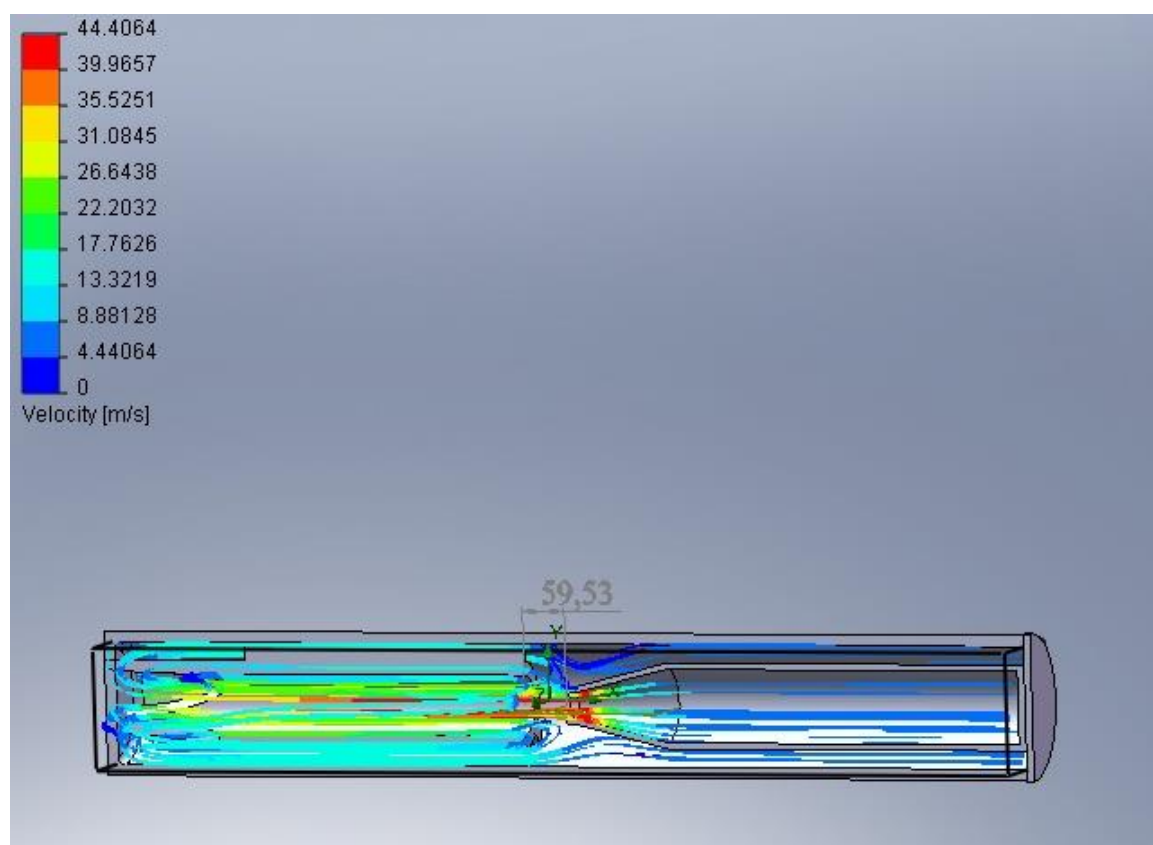
Программа Cosmos FloWorks позволяет достаточно быстро и с удовлетворительной точностью решать нестационарные задачи обтекания трехмерных тел, а также исследовать внутренние течения с учетом процессов теплообмена. Для рассматриваемой задачи конвективного теплообмена программа позволяет исследовать течения как несжимаемого, так и слабо сжимаемого газа, температура которого может значительно отличаться от температуры тела. Математические модели движущегося газового потока в задаче описываются с помощью уравнений Навье-Стокса для сжимаемой жидкости с учетом процессов теплообмена. Эти уравнения в нестационарной постановке являются законами сохранения массы, импульса и энергии движущейся среды. Уравнения моделируют турбулентные, ламинарные и переходные течения. Для турбулентных течений используются дополнительные уравнения переноса кинетической энергии турбулентности и ее диссипации. Для дискретизации области расчета и анализа теплообмена неподвижных тел в движущейся среде в программе Cosmos FloWorks использован метод конечных объемов с прямоугольной сеткой, что обеспечивает универсальность и простоту ее использования. В процессе расчета сетка конечных объемов измельчается по заданному закону в зонах предполагаемых больших градиентов каждой из зависимых переменных или в зонах значительного изменения кривизны поверхности твердого тела. Основными критериями при выборе программного пакета являлись функциональность, быстродействие, потребный объем оперативной памяти, удобство и простота использования.

					ЮУрГУ.151000.995.00ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		23

Результаты матмоделирования

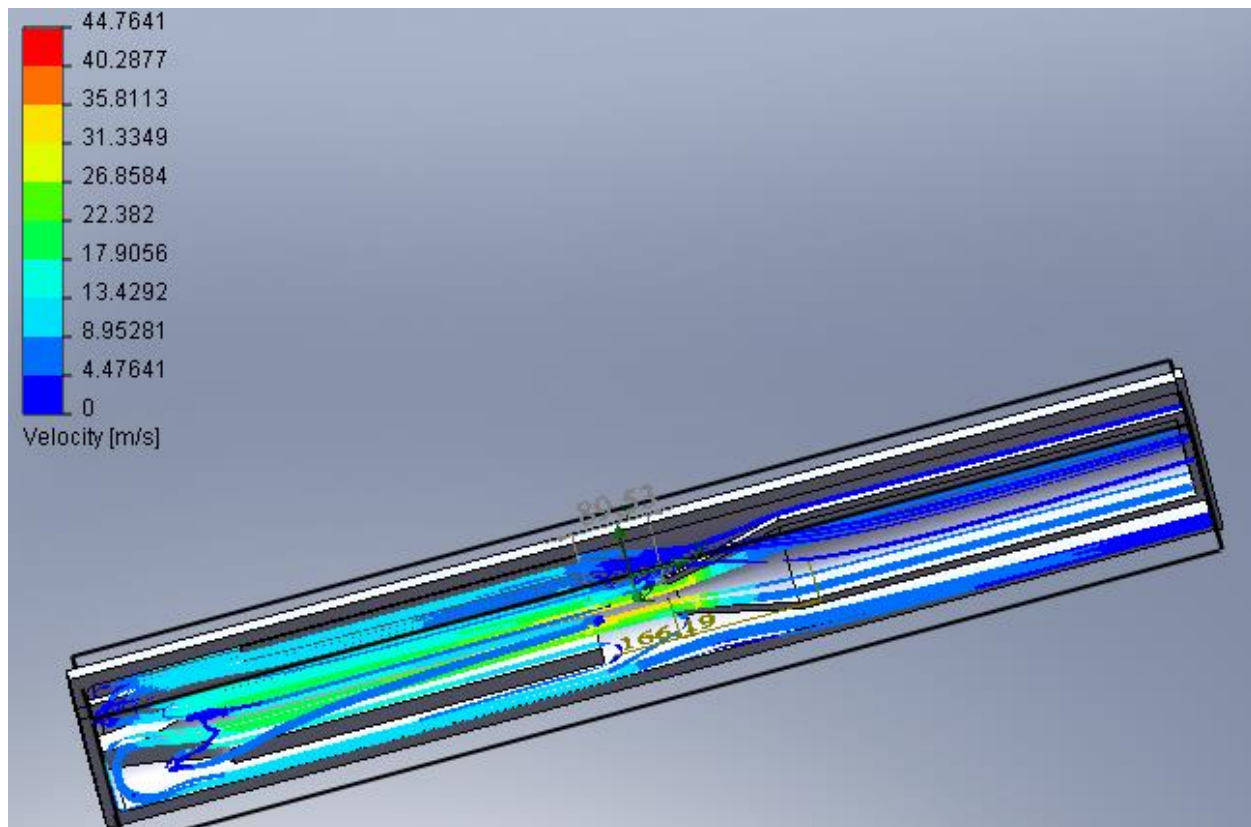


Расчёт 1 расстояние до среза 35

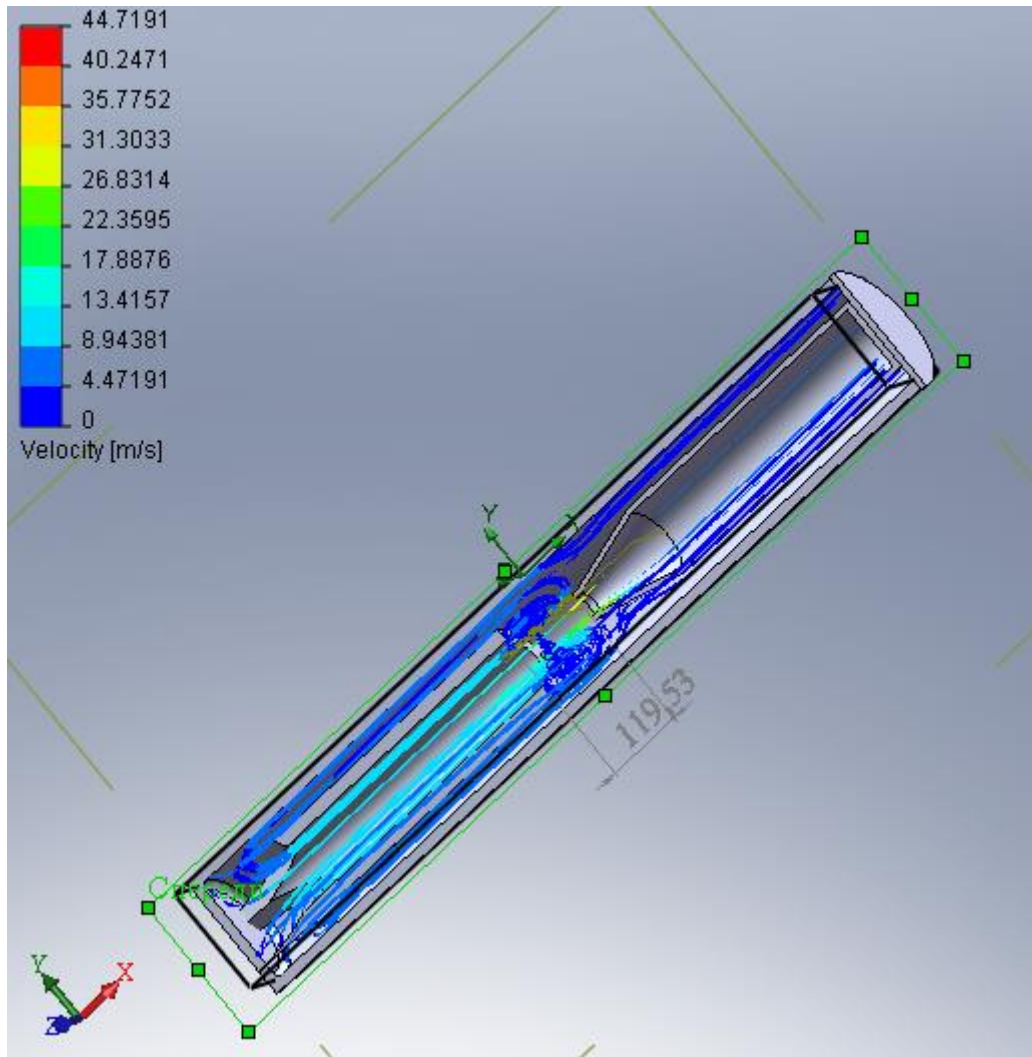


Расчёт 2 расстояние 59.53

циркуляция есть, вторичного тормозящего вихря нет



Вариант 3 расстояние 89.53 начало вторичного вихря скорость циркуляции падает



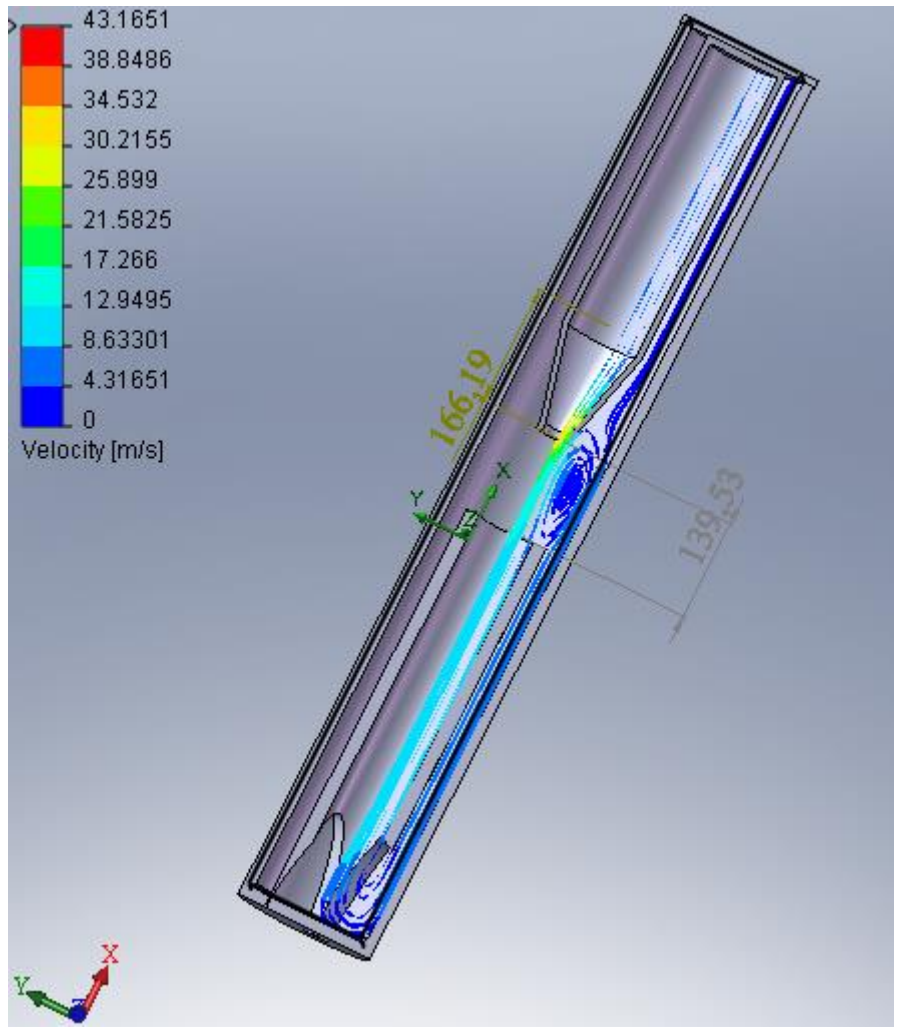
Вариант 4 расстояние 119,53 запирающий вихрь проявился

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ЮУрГУ.151000.995.00ПЗ

Лист

26

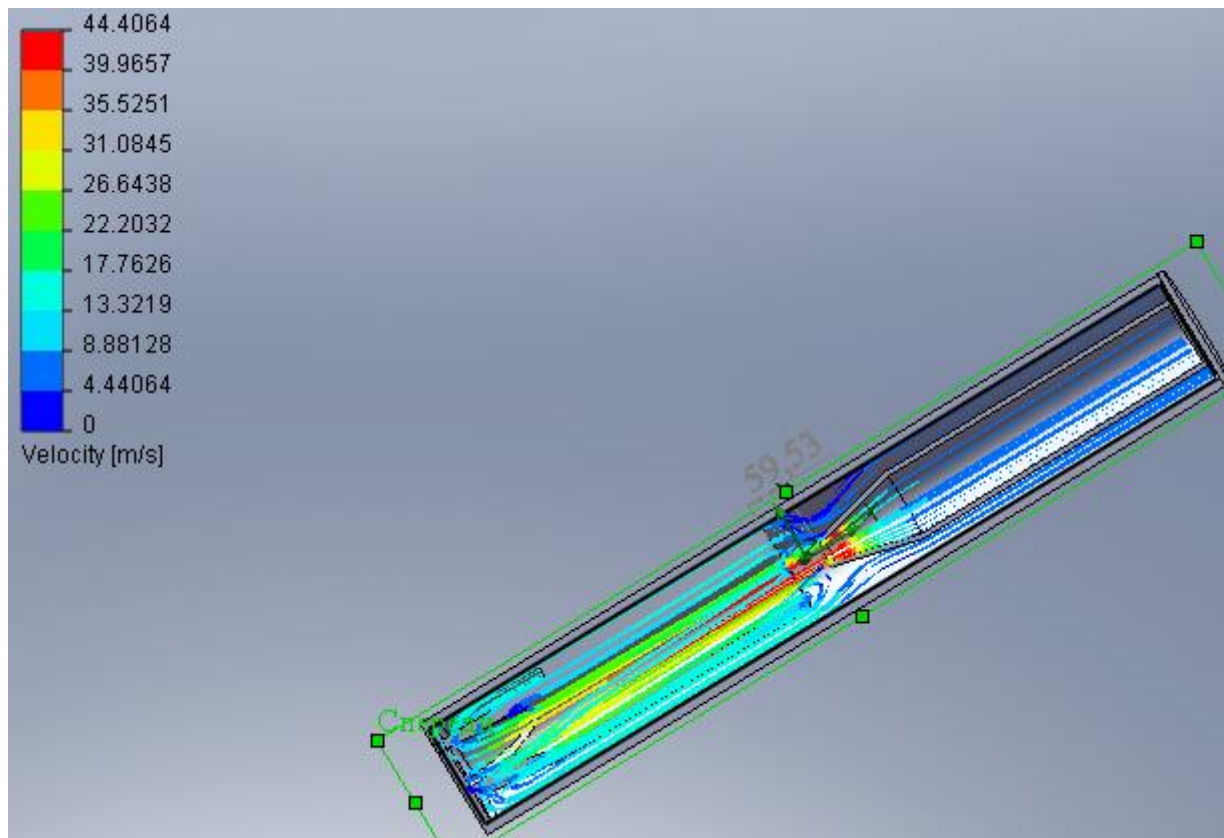


Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ЮУрГУ.151000.995.00ПЗ

Лист

27



Вариант 5 расстояние 139,53 вихрь запирает поток

Заключение

Как показывают результаты математического моделирования оптимальное расстояние между горелкой и рассекателем составляет 59,6 мм. в связи с наличием циркуляции и с отсутствием тормозящего вихря. Таким образом достигается оптимальная теплоотдача, наиболее полное сгорание, равномерность температуры жаровой трубы, а также исключается перегрев и сажеобразование.

Презентация на 15 листов

2 плаката чертеж + результаты матмоделирования

					ЮУрГУ.151000.995.00ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		29

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зельдович Я. Б., Баренбдтат Г. И., Либрович В. Б., Махвиладзе Г. М. Математическая теория горения и взрыва. М.: Наука 1980.
2. Кнорре Д. Г., Эмануэль Н. М. Курс химической кинетики. М.: Высшая школа, 1974.
3. Франк-Каменецкий Д. А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М.: Наука, 1967.
4. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Гидродинамика. М.: Наука, 1986.
5. Кузнецов В. Р., Сабельников В. А. Турбулентность и горение. М.: Наука, 1986.
6. Винтовкин А. А., Ладыгичев М. Г., Гусовский В. Л., Усачев А. Б. Современные горелочные устройства (конструкции и технические характеристики) Справочник М. Машиностроение-1, 2001.
7. Юдаев Б.Н. Теплопередача. Учебник для вузов. М., Высшая школа, 1973
8. Беннет К.О., Майерс Дж. Е. Гидродинамика, теплообмен и массообмен, Издательство Недра, М. 1966.
9. Андерсон Д., Таннехилл Дж., Плетчер Р. Вычислительная гидромеханика и теплообмен: В 2-х томах, М. Мир, 1990
10. Винтовкин А. А., Ладыгичев М. Г., Гусовский В. Л., Калинова Т. В. Горелочные устройства промышленных печей и топок. Справочник. — М.: Интернет Инжиниринг, 1999.
11. Арсеев А. В. и др. Опытные характеристики работы промышленных горелок. //Теория и практика сжигания газа. — Л.: Недра, 1972.
12. Винтовкин А. А., Арсеев А. В. Стабилизация факела при сжигании природного газа в длиннопламенных горелках. Реф. сб. Использование газа в народном хозяйстве. Вып. 1 — М.: ВНИИЭГазпром, 1975.
13. Спиридонов Ю. А. Математическое моделирование процессов при поперечных струйных течениях. Сб. Интенсификация тепло- и электроэнергетических процессов. 1995.

					ЮУрГУ.151000.995.00ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		30

14. Гусовский В. Л., Лифшиц А. Е., Тымчак В. М. Сожигательные устройства нагревательных и термических печей. Справочник. — М.: Metallurgy, 1981.
15. Пестряев А. С., Каратаев В. Л., Дружинин Г. М. и др. Отработка горелочных блоков для камер нагрева цинковальных агрегатов. // Сталь. 1980.
16. Шевелев Ю. Д. Пространственные задачи вычислительной аэрогидродинамики — М.: Наука, 1986.
17. Трехмерные турбулентные пограничные слои. Пер. с англ./Под ред. Х.Фернхольца, Е. Краузе.—М.: Мир, 1985.
18. Тихонов А. Н., Самарский А. А. Уравнения математической физики.—М. 1972
19. Петухов И. В. Численный расчет двумерных течений в пограничном слое.—В сб.: Численные методы решения дифференциальных и интегральных уравнений и квадратурные формулы.—М.: Наука, 1964
20. Пасконов В. М., Полежаев В. И., Чудов Л. А. Численное моделирование процессов тепло- и массообмена.—М.: Наука, 1983
21. Годунов С. К., Забродин А. В., Иванов М. Я., Крайко А. Н., Прокопов Г. П. Численное решение многомерных задач газовой динамики.—М.: Наука, 1976.