

**Некоммерческое акционерное общество  
«АЛМАТИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭНЕРГЕТИКИ И СВЯЗИ ИМЕНИ  
ГУМАРБЕКА ДАУКЕЕВА»  
ИНСТИТУТ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ И ТЕПЛОТЕХНИКИ**

Кафедра Тепловые энергетические установки  
Специальность Теплоэнергетика

Допущен к защите  
Зав. кафедрой ТЭУ \_\_\_\_\_ А.А.Кибарин  
« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

Тема: Исследование микрофакельных устройств в камерах сгорания ГТУ

Магистрант \_\_\_\_\_ Нысан А.К. \_\_\_\_\_  
подпись (Ф.И.О.)

Руководитель диссертации \_\_\_\_\_ Туманов М. \_\_\_\_\_  
подпись (Ф.И.О.)

Рецензент \_\_\_\_\_ Тютеебаева Г.М. \_\_\_\_\_  
подпись (Ф.И.О.)

Алматы, 2020г.

**Некоммерческое акционерное общество  
«АЛМАТИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭНЕРГЕТИКИ И СВЯЗИ ИМЕНИ  
ГУМАРБЕКА ДАУКЕЕВА»**

Факультет Теплоэнергетика и теплотехника  
Специальность Теплоэнергетика  
Кафедра Тепловые энергетические установки

**ЗАДАНИЕ**

на выполнение магистерской диссертации

Магистранту Нысан Адилхан Кажмуханулы  
(фамилия, имя, отчество)

Тема диссертации: Исследование микрофакельных устройств в камерах сгорания ГТУ

утверждена Ученым советом университета № от « » октября 2020г.

Срок сдачи законченной диссертации « »

Цель исследования: Исследованы несколько направления развития конструкции турбины в рамках изучаемой научной проблемы. Выявлены основные перспективы развития КС и горелочных устройств. На основе анализа показана перспективность применения микрофакельных устройств для КС ГТУ на газообразном топливе.

Перечень подлежащих разработке в магистерской диссертации вопросов или краткое содержание магистерской диссертации:

В первой части магистерской диссертации говорится о видах микрофакельных устройств, а так же различия и способы разных методов горения. Представлены виды конструкции горелок и их принципы работы. Основные направления разработки микрофакельных устройств.

В второй части проведено численное моделирование Численное моделирование процессов горения, позволяют более детально объяснить процессы горения, при проведении экспериментов, в виду того, что реальные процессы горения достаточно скоротечны

Рекомендуемая основная литература

Достяйров А.М. Разработка топливосжигающих устройств с микрофакельным горением и методики их расчета: дис. док. техн. наук:

05.14.04 г.Алматы: КазНИИ Энергетики им. Чокина, 2000. - 237с



## **1. МЕТОДЫ СЖИГАНИЯ И УСТРОЙСТВА**

1.1 Микромодульные камеры сгорания и горелки

1.1 Струйно-стабилизаторный метод сжигания

1.2 КС со встречно закрученным течением воздушного потока

1.3 Перфорированный фронт

1.4 Воздушные форсунки стабилизаторы

1.5 Горелочные устройства на базе хорошо обтекаемых тел

1.6 Горелочные устройства на базе плохообтекаемых тел в виде уголков

1.7 Выводы по разделу. Постановка задачи .....

## **2. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ ЗА УГОЛКОВЫМИ СТАБИЛИЗАТОРАМИ.....**

1.8 Математическая модель .....

1.9 Модель образования оксидов азота .....

2.1 Изучение процесс о перемешивания топлива.....

2.2 Изучение процесса горения в микрофакельной горелке.....

2.3 Изучение процессов горения за уголковыми стабилизаторами .....

2.4 Выводы по разделу.....

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....**

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....**

## ВВЕДЕНИЕ

Существуют различные способы получения энергии, и газовые турбины можно отличить от них. Газовые турбины используются в двух областях. Первые, учитывая, что газовые турбины используют в качестве топлива в основном газ, а по сравнению с углем, являются наиболее экологически чистыми, так как состоят на 90 процентов из метана, и могут выгорать практически полностью. Во-вторых, эти двигатели широко используются в авиационной промышленности, и на данный момент трудно найти достойную замену газовым турбинам, поскольку они обладают высокой мощностью, низкими выбросами и компактностью.

Казахстан имеет запасы газообразного топлива и не имеет достаточных мощностей. Согласно Программе развития энергетики до 2030 года, планируется увеличить производство электрической энергии за счет газотурбинных установок. В программе также говорится об использовании передовых методов сжигания топлива и увеличении количества газообразного топлива в энергетическом балансе.

Природный газ - это самое чистое и органическое топливо, которое не содержит золы и сернистых соединений. Широкое внедрение природного газа связано со значительным улучшением состояния окружающей среды от золы, сажи и сернистых соединений, с повышением эффективности и культуры производства. Исходя из этого, необходимо сконцентрировать научные исследования в Республике Казахстан в области теории и практики сжигания и использования газа, учитывая его большую долю в топливно-энергетическом балансе нашей страны. На данный момент существует несколько точек по этому методу:

1. Концентрация вредных веществ в камере сгорания;
2. Коэффициент полезного действия;
3. Увеличение часов работы оборудования

В настоящее время газотурбинные двигатели дают очень хорошие показатели по выбросам вредных веществ на выходе из турбины. Существуют также турбины с выбросами оксидов азота, где концентрация оксидов составляет не менее 15 ppm, такие турбины требуют очень больших финансовых вложений. И на данный момент наиболее практичным способом является поиск новых технологий, оптимальных с точки зрения финансовых затрат и эффективности. Расчет и исследование новых методов сжигания газообразных топлив требует пересмотра ряда положений по Горенскому процессу, где в камере сгорания используются сопловые горелочные устройства.

Одним из наиболее подходящих способов является выполнение камер сгорания на этом типе горелок, которые будут рассредоточены по поперечному сечению рабочей зоны с прогреваемыми телами или за счет топлива, где процессы горения будут аналогичны сжиганию предварительно подготовленных ТВС.

Это метод макрофагального сжигания. Использование этих методов дает нам: уменьшить выбросы токсичных веществ, уменьшить конструкцию и расход металла, а также сделать полное горение топлива

**Цель работы:** является исследование микрофакельных устройств в КС, так же методы горения для того чтобы уменьшить выбросы вредных веществ на газовых турбинах, в том числе оксид азота, и так же может быть модернизация действующего ГТУ, для обеспечения хороших технических, и экологических показателей турбины при использовании газообразного топлива.

В соответствии с этой целью и имея большую площадь научных направлений, включающих различные физико-химические процессы горения, теплообмена и термодинамики, возникает ряд задач:

- проанализировать конструкцию газовых горелок, стабилизаторов угла наклона для камеры сгорания;

- расчет численного моделирования процесса горения, а также появления вредных веществ, в том числе оксидов азота, в микрофакельных устройствах при сжигании газообразного топлива;

По сжиганию газообразного топлива-изучить влияние конструктивных и аэродинамических параметров на стабилизацию процесса горения за микрофакельными устройствами.

**Научная новизна.** На основании численного моделирования и исследований разработаны принципы создания эффективных топливосжигающих устройств КС ГТУ основанных на принципе микрофакельного горения.

# 1. МИКРОФАКЕЛЬНЫЙ МЕТОД СЖИГАНИЯ И УСТРОЙСТВА

Микрофакельное сгорание газообразного топлива впервые обнаружено в работе [1], затем оно разработано для ГТД в работах Христинича В. А., Пчелкина Ю. Н. М., Сударев В. В. и др. [2,3,4].

Исследование современных методов и конструкций камер сгорания позволяет проанализировать и установить основные требования к ним. Согласно [5] современные камеры сгорания газотурбинных двигателей должны соответствовать следующим критериям:

- высокий коэффициент полного сгорания топлива. Современные КС должны иметь  $\eta_{\text{КС}} = 98,5 \div 99,5\%$ ;
- небольшие потери гидравлического давления;
- высокая тепловая нагрузка рабочего объема;
- низкая температурная неравномерность температуры дымовых газов в КС, обеспечивающая надежную работу турбины;
- быстрый и надежный запуск и стабильная работа во всех диапазонах нагрузок;
- долговечность конструкций, высокая надежность;
- отсутствие дыма, углерода и токсичных веществ.

Проведенный Горенье-Горенье анализ различных методов и принципов горения в микрофакельных устройствах и многоядерных камерах сгорания показал особенности микрофакельного горения, которые могут быть максимально приближены к требованиям, предъявляемым к камерам сгорания газотурбинных двигателей, представленным выше. сжигание топлива или методы горения Макрофаг - это своего рода обусловливание горения.

Анализ основных причин образования оксидов азота в различных устройствах и перспектив развития энергетики показал, что традиционные методы сжигания топлива не обеспечивают требуемых параметров токсичности. Повышение теплового напряжения рабочего объема и эффективности сжигания топлива может быть получено при использовании микрофакеля как метод сжигания, как показано в работе [6].

Несмотря на ограниченный объем экспериментальных данных по применению микрофакельного горения в ГТД, различными авторами отмечены следующие положительные качества этого метода: низкие потери давления газа, уменьшенные габариты конструкций, уменьшенная неравномерность температурного поля на выходе из КС, низкий выход оксидов азота с продуктами сгорания, снижение радиационных потерь [7, 8, 9].

Будучи еще известной с середины XX века [8], технология сжигания микрофакеля начала привлекать внимание ученых сравнительно недавно. В настоящее время существует несколько основных направлений сжигания микропены, но все они имеют одну общую черту-это " размазывание " Факела по фронту и объему Горенья. Поэтому конструкция переднего устройства имеет важное значение для современных камер сгорания.

Развитие фронтальной поверхности факеля в единице объема зоны процесса сжигания топлива, рациональное использование этого объема за счет повышения коэффициента турбулентности движущихся потоков, связка отдельных кондиции рабочего процесса и функций компонентов рабочего тела-все это обеспечивает микрофакельное горение в потоках которые движутся прямо. Таким образом, экспериментально можно увидеть, что при одной и той же конструкции передней форсунки переднего устройства, только за счет совершенствования горелки и устройств подачи воздуха, процессов распыления и первичного перемешивания, испарения и воспламенения в каждой единице объема при одном и том же напоре, теперь можно сказать что сжигается на порядок больше топлива в единицу времени, чем было до этого, и выделяется около 140-160 Вт/(м<sup>3</sup>-ПА) тепла.

При переходе от одной горелки к многофакельным горелкам, т. е. к принципиально другому способу сжигания топлива в системе взаимодействующих струйных структур, были нами показаны практически те же значения, но длина факела и камеры сгорания была уменьшена примерно в 2 раза. Это говорит о решающем влиянии на интенсификацию процесса горения применяемого способа стабилизации горения и сжигания топлива под руководством компаний Gorenje.

Резкое увеличение удельной поверхности передней части пламени возможно только при качественном изменении аэродинамической структуры потоков в передней части камеры сгорания.

В микромодульных конструкциях фронтальных устройств объемное тепловыделение увеличивалось на порядок по отношению к многожильным устройствам и достигало 800-1000 Вт / (м<sup>3</sup>-ПА) в экспериментальных исследованиях на полупромышленных схемах и конструкциях[4].

Уменьшение по конструкции размеров рабочей зоны камеры сгорания при большей интенсивности процессов в головке всегда приводит к уменьшению неравномерности температуры за камерой в случае сгорания топлива во всем воздушном потоке (без разделения его на отдельные тракты), так как вторичное перемешивание практически начинается с переднего устройства и в основном заканчивается на участке, где заканчивается выгорание топлива.

Если в камере предусмотрена отдельная зона вторичного сжигания, то температурный поток продуктов сгорания всегда будет более однородным в поперечном сечении на входе в нее, за более интенсивной зоной горения, что также определяет меньшую конечную неравномерность температурного поля.

При укорочении зоны горения поверхность камерных элементов, подверженных лучистому тепловому потоку от горячей горелки, значительно уменьшается, что позволяет поддерживать более умеренную температуру этих элементов даже при меньшем расходе охлаждающего воздуха. Радиационный тепловой поток от факела к стенкам "огненных" элементов особенно резко снижается при осуществлении микрофакельного сжигания топлива во всем потоке воздуха, поступающего в камеру сгорания [10].

Сжигания топлива или само горение происходит при средних массовых температурах, близких к нижней границе диапазона оптимальных температур реакции для сжигания углеводородных топлив, что приводит к благоприятному эффекту снижения температуры жаровых труб. Следует подчеркнуть, что в таких конструкциях камер сгорания максимальная температура достигается не пламенными трубами, закрывающими факел с его боковых поверхностей, а стенками обращенных к факелу элементов переднего устройства - горелок, стабилизаторов, распределительных планок и др. Эти элементы в первую очередь подвергаются агрессивной коррозии и тепловому воздействию Факела. Поэтому особое внимание конструкторов фронтальных устройств микрофасетирования камер сгорания следует уделять разработке новых конструктивных схем горелки и узлов стабилизации, созданию новых, более интенсивных методов охлаждения (в том числе с использованием инвентаря "холода", содержащегося в топливе), внедрению коррозионностойких и термостойких покрытий (в том числе конструкционных материалов на основе керамики) и др.

При уменьшении длины Факела изменяется и диапазон возможных вибрационных режимов горения, он смещается в сторону более высоких и менее опасных частот. При одновременном развитии и взаимодействии нескольких параллельных факелов в зоне горения резко снижается вероятность регулярных продольных, радиальных или окружных пульсаций, так как каждый отдельный факел всегда отличается от своих соседей по некоторым геометрическим, аэродинамическим или тепловым параметрам, а следовательно, имеет различный спектр собственных колебаний. И так же, при параллельной работе нескольких форсунок появляется и конструктивная способность подавлять или уменьшать потенциал колебательных процессов в зоне горения: организация струйных разделителей, разделяющих зону горения на ряд отдельных участков; введение поперечных перегородок в топливный тракт; неравномерность характеристик течения соседних топливных струй и др.

Совершенствование газотурбинных установок с микрофакельным горением, возможность получения оптимального температурного графика для высоты лопаток турбины приобретает все большее значение. Оптимальный участок обычно неравномерен, он имеет максимальный показатель, превышающий среднемассовое значение начальной температуры рабочего тела на входе в турбину. Это связано с желанием разработчиков равномерно загрузить все секции лопасти. Естественно, что легче всего сформировать желаемое радиальное распределение температуры в многожилых конструкциях, особенно при многоярусном размещении горелок, т. е. интенсификация рабочего процесса, которая обычно достигается расщеплением горелки, всегда сопровождается большей маневренностью в получении необходимого температурного профиля, в контроле и регулировании температурной неравномерности в окружном направлении, в управлении выходным температурным полем в зависимости от нагрузки установки и т. д.

Отмеченная особенность микрофакельных камер сгорания со

специфическими рациональными конструктивными решениями фронтального устройства позволяет снизить чувствительность температурного поля на выходе из камеры к воздействию на окружающую неравномерность препятствий, расположенных в потоке сжатого рабочего тела перед воздухопроводными элементами головки камеры. Некоторые микрофакельные конструкции передних устройств обеспечивают возможность значительного уменьшения такого негативного влияния аэродинамических следов от восходящих препятствий на окружающую неравномерность выходного температурного поля камеры сгорания[11,12].

Сочетание первичного перемешивания, выгорания и вторичного перемешивания, а также проблема регулирования температурного поля, казалось бы, существенно усложняют конструкцию переднего устройства камеры сгорания. Но и здесь вполне возможно создать относительно простые решения в микрофакельных устройствах, которые успешно выполняют эти задачи.

В наше время в основном применение в промышленности, то есть в энергетике получают такие установки, которые универсальны в различных условиях эксплуатации, не зависят от климата региона, характера привода, наличия регенератора в схеме установки и т.д. Одним из важнейших условий является независимость установки от типа сжигаемого топлива, что связано с разработкой и отладкой многотопливных камер сгорания, т. е. камер сгорания, в которых могут сжигаться различные виды топлива (параллельно в любом соотношении или последовательно). В этом случае переход с одного вида топлива на другой должен осуществляться без остановки агрегата или изменения его режима работы.

ГТУ работают в сложных климатических условиях: температура воздуха колеблется от 5°C зимой до 50 °C летом. ГТУ может работать на газообразном и жидком топливе, а также на обоих видах топлива одновременно. Переключение с одного вида топлива на другой происходит автоматически. Одновременное сжигание различных по химическому и фазовому составу топлив с различными закономерностями выгорания, стехиометрическими характеристиками, температурами реакции горения в текущем сечении и др. следует внести соответствующие изменения в работу систем управления, контроля и защиты агрегата. Кроме того, может оказаться целесообразным ввести регулирование расхода первичного воздуха в зависимости от массового соотношения сжигаемых в этом режиме топлив. Иногда в ГТУ, работающих на низкокалорийном топливе, необходимо добавлять высококалорийное топливо в камеру сгорания в некоторых режимах работы (пуск, холостой ход, остановка) с целью улучшения процессов воспламенения и стабильности работы горелки в этих режимах. При проектировании камер сгорания для сжигания газообразных топлив с различной теплотворной способностью необходимо рассчитать процессы стабилизации и первичного перемешивания и определить размеры воздушных и топливных трактов и фитингов таким образом, чтобы обеспечить надежную работу камеры сгорания, как на высоких, так и на низких теплотворных свойствах.

Задачи создания и эксплуатации многотопливных камер органично вписываются в общий подход к проектированию фронтальных устройств

камер сгорания микротоплива с характерной возможностью либо замыкания различных топливных систем на автономные горелочные комплексы, либо подачи различных видов топлива в каждый микротоплив по отдельным коммуникациям. Можно создать единую топливную систему для двух видов топлива: газообразного и предварительно выпаренного жидкого.

Макрофагальное горение, тем самым повышая эффективность работы камеры сгорания. Завершение процесса выгорания на меньшем расстоянии от переднего устройства приводит к возгоранию хвостовой зоны Факела, в которой отдельные частицы топлива, не реагирующие на окисление в основном участке зоны горения, выгорают Горенье. Скорости тепломассообменных процессов в зоне выгорания невелики, поэтому ее протяженность в несколько раз, а то и на порядок больше, чем в зоне горения высокой интенсивности. Именно хвостовые участки Факела являются основным источником продуктов неполного сгорания в выхлопных газах. Необходимо создать такую кинематику потока в головной части камеры, при которой практически все топливо сгорает в ее пределах, что снижает химическую неполноту сгорания, в том числе и в частичных режимах работы установки.

Поддержание высокого выгорания топлива при номинальных, переходных и частичных нагрузках, на холостом и пусковом режимах в камерах сгорания микрофакеля как с возможностью регулирования коэффициента избытка воздуха в отдельных зонах пожарного пространства путем изменения расхода топлива, так и с изменением количества таких зон путем разъединения-соединения целых секторов, каскадов микрофакельных устройств.

В то же время усложняются системы подготовки, подачи и распыления топлива, автоматического управления и управления агрегатом, но каждая зона обеспечивает условия выгорания в оптимальном температурном диапазоне. При сжигании топлива в микрофакельных камерных конструкциях возникает дополнительный эффект экономичности за счет снижения гидравлического сопротивления на величину, пропорциональную потере давления во вторичной зоне. Конечно, эти потери полностью не исчезают, так как вторичное перемешивание осуществляется в головке камеры сгорания, протекая параллельно-последовательно с процессами испарения первичного перемешивания и выгорания топлива.

Для повышения КПД микрофакельных камер сгорания нужно уменьшить поток воздуха что сразу же скажется, направленного в систему охлаждения огнеупорных элементов камеры. Это связано со значительным уменьшением общей поверхности, что требует интенсивного отвода тепла, упрощения конструкции системы охлаждения и снижения температурного уровня охлаждаемых деталей. Основная масса воздуха подается в первичную зону, вызывая незначительное снижение средней массовой адиабатической температуры зоны Горенья, а, следовательно, и теплового потока излучения, падающего на поверхности, обращенные к факелу.

А самое главное преимущество этого горения связано с повышением экологичности газотурбинного двигателя — направления, которое становится

все более актуальной темой и масштабным вопросом и предназначено для изменения конструктивных решений по уменьшению концентрации токсичных веществ в продуктах сгорания газозвоздушных топлив. В настоящее время в традиционных конструкциях для улучшения экологических характеристик ГТУ используются многочисленные способы и методы. Это, например, улучшение распыливания топлива, особенно в частичных режимах работы установки; нагнетание воды или пара в зону пожара для подавления реакции образования NO<sub>x</sub>; добавление специальных дымовых добавок к топливу для снижения концентрации частиц сажи в отработавших газах; интенсификация перемешивания в первичной зоне камеры для устранения причин неполного сгорания продуктов в рабочем органе.

Многие ведущие газотурбинные компании приступили к созданию принципиально новых конструкций камер сгорания с главной целью - значительно снизить токсичные выбросы ГТУ. Наиболее радикальным направлением для резкого снижения NO в продуктах сгорания является снижение средней массовой температуры Факела в зоне горения.

Реализация этого решения в конкретных установках практически связана с разработкой новых чрезвычайно интенсивных методов стабилизации горения и формирования Факела, предотвращающих возможность механической и химической неполноты горения из-за снижения скорости реакции окисления при более низких температурах Факела. Так, в камере сгорания ГТН-25 был реализован способ сжигания топлива за системой кольцевых коаксиальных стабилизаторов-горелок, обтекаемых системой кольцевых коаксиальных струй переменного кручения. Концентрация оксидов азота в отработавших газах ГТУ составляет всего 35-70 мг / м<sup>3</sup>, что в несколько раз ниже допустимых норм.

Целесообразно одновременно использовать принцип подачи воздуха через несколько каскадов или ярусов, последовательно или параллельно расположенных вдоль потока рабочей среды. В случае параллельного расположения процесс горения происходит независимо только на первой ступени, на следующей-горящая горелка взаимодействует с потоком продуктов сгорания предыдущей ступени, и, конечно же, это влияет на процессы устойчивости воспламенения и выгорания топлива и должно учитываться при гидравлических и тепловых расчетах второго и последующих каскадов.

В многоступенчатых или многоярусных камерах сгорания с потоком всего воздуха в зоне горения с целью увеличения полноты сгорания топлива и снижения содержания NO<sub>x</sub> в отработавших газах на промежуточных режимах ГТД может быть реализовано последовательное соединение ступеней (пуск и выход на холостой ход осуществляются с включением и поступательной нагрузкой одного каскада, а нагрузку последовательно соединяют с горелкой второго каскада и т. д.). Горячие газы, выходящие из первой ступени, взаимодействуют, в зависимости от режима работы агрегата, с относительно

холодным потоком воздуха (на холостом ходу, при нормальной остановке, при пуске) или с продуктами сгорания второй ступени ( на режимах работы) различного температурного уровня. Поэтому при проектировании такой камеры сгорания должны быть рассчитаны все возможные режимы взаимодействия параллельных или соосно движущихся потоков последовательно расположенных каскадов, в том числе и в том случае, когда топливо предыдущего каскада выгорает при смешивании с потоком последующего.

Для улучшения экологических характеристик микрообработки камер сгорания многорежимной газовой турбины потребовалась существенная перестройка конструкции. В камере должно быть несколько зон горения, в каждой из которых процесс горения протекает по-разному. Например, двухзонная камера сгорания: в первой зоне состав смеси поддерживается на относительно низких скоростях, близких к стехиометрическим, что позволяет значительно снизить концентрационные уровни продуктов химической неполноты сгорания  $CO$ ,  $A$  во второй, наоборот, обедненная смесь сжигается при высоких скоростях потока, что обеспечивает снижение содержания оксидов азота в продуктах сгорания. Последовательная скорость подачи топлива и воздуха в значительной степени изменяет процесс горения топлива, так как в ходе течения резко меняется и расход топлива, и расход воздуха, и коэффициент избытка и т. д.

Не всегда удается создать новые высокоэффективные методы стабилизации пламени и сжигания топлива, которые, если бы они были коммерчески развиты, реализовали бы вышеупомянутые усовершенствования в рабочем процессе. Как правило, многие результаты достигаются на основе разумного компромисса между выдвигаемыми требованиями.

Возгорание обычно происходит примерно за 15 градусов до верхней мертвой точки . Свеча зажигания должна быть расположена таким образом, чтобы фронт пламени мог перемещаться по всей камере сгорания. Хорошая конструкция должна избегать узких щелей, где застойный "концевой газ" может попасть в ловушку, так как этот газ может сильно детонировать после основного заряда, добавляя мало полезной работы и потенциально повреждая двигатель.

Таким образом, по нашему мнению, наши последующие эксперименты в микрофакельных устройствах со встречно-закрученными токами покажут вышеупомянутые преимущества МФС газообразного топлива.

Анализ современных методов и конструкций КС позволяет проанализировать и установить основные требования к ним. Согласно [53] современные КС газовых турбин должны соответствовать следующим критериям:

- высокий коэффициент полного сгорания топлива. Современные КС должны иметь  $ПС = 98 \div 99\%$ ;

- низкая потеря гидравлического давления;
- высокая теплоемкость рабочего объема;
- низкая температурная неравномерность температур на выходе из КС, обеспечивающая надежную работу турбины;
- быстрый и надежный запуск. Стабильная работа во всех диапазонах нагрузок;
- долговечность конструкций, высокая надежность;
- отсутствие дыма, углерода и токсичных веществ.

Проведенный анализ различных методов и принципов горения микрофокусных устройств показал особенности микропатронного горения, которые могут наиболее близко подходить к требованиям, предъявляемым к КС выше. Макрофагальное горение является своеобразным кондиционированием процесса горения [6, С. 37].

Несмотря на ограниченный объем экспериментальных данных по использованию микрофакельного горения в КС, различные авторы [54] отмечают следующие положительные качества этого метода: низкие потери давления газа, уменьшенные размеры конструкций, уменьшенная неравномерность температурного поля на выходе КС, низкий выход оксидов азота с продуктами сгорания, снижение потерь излучения [55-57].

Будучи еще известной с середины XX века [58], технология сжигания микрофакеля начала привлекать внимание ученых сравнительно недавно. В настоящее время существует несколько основных направлений сжигания микрофакеля, но все они имеют одну общую черту-это "размазывание" Факела по фронту и объему Горенья [6, С. 38].

## 2.1 Микромодульные камеры сгорания и горелки.

Эти принципы были реализованы на газотурбинных установках GT-25-700-II, GT-700-12M, GT-50-800. Исследование проводилось как с оригинальным КС, так и с модифицированным КС, что позволяет четко видеть полученные результаты.

Известно, что CS компании ALSTOM используют многожильные CS. Компания использует горелки под брендами EV и AEV. Выбросы NOx газовой турбины при использовании этих горелок не превышают 15 ppm [34]. Если у ГТУ АВВ GT10 (23 МВт) было только 18 горелок, то у АВВ GT13E (>150 МВт) 72 горелки установлены в два круглых ряда.

В камерах сгорания внутренняя энергия топлива при сжигании преобразуется в потенциальную энергию рабочего тела. В современных ГТУ используется жидкое или газообразное топливо. Для сжигания топлива необходим окислитель, которым служит кислород воздуха. Воздух повышенного Давления поступает в камеру сгорания после компрессора.

При сжигании топлива образуются газообразные продукты сгорания

высокой температуры, которые перемешиваются с дополнительным количеством воздуха. Образующийся горячий газ (рабочее тело) направляется в газовую турбину.

Известны газотурбинные горелки General Electric LM6000. КС, производимый этой компанией, выполнен в виде двух колец. В наружных двух кольцах имеется 60 форсунок, а во внутреннем-15. Такое расположение колец облегчает работу при частичной нагрузке. 75 форсунок соединены 30 штоками с устройствами предварительного смешивания. Турбины LM6000-PD имеют выбросы NOx близкие к 25 ppm, с мощностью 50 МВт.

Технология DLE широко известна. В системе DLE он сжигается

"предварительно смешанная обедненная смесь" топлива и воздуха, которая производит мало NOx и CO. В системе" предварительного смешивания обедненной смеси" образование со остается относительно низким до тех пор, пока оно не приблизится к условиям отказа пламени из-за" истощения " смеси. В этой системе концентрация NOx и CO контролируется путем поддержания соотношения газа к воздуху и температуры пламени в узком диапазоне, где поддерживается устойчивое горение при низких уровнях выбросов.компания Gorenje

Интерес представляют исследования НАСА по созданию многожильных устройств [33, с. 84].

К микрообработке можно примерно отнести 120-модульный кольцевой КС, предназначенный для двигателей фирмы "Пратт энд Уитни". Каждый модуль состоит из смесителя, завихрителя и стабилизатора. Испытания этого КС показали, что короткая длина факелов, обеспеченная достаточно высокой степенью предварительного и вторичного перемешивания, снижает образование оксидов азота. При испытании камеры значения концентрации NOX были в два раза ниже, чем в обычных камерах. Недостатком таких КС является узкий диапазон концентраций малотоксичной работы.

Исполнение таких КС аналогично исполнению General Electric LM6000 CS. Только в NASA CS вместо колец используются ярусы. При малых нагрузках работают только горелки наружного (наружного) яруса, а при полных нагрузках работают все горелки. Следует отметить, что на выбросы NOX влияет не только стадия включения ярусов (колец), но и соотношение топливо/воздух. Одним из недостатков такой конструкции является сложность системы из-за необходимости переключения ярусов (колец). Также отмечается, что такие системы склонны к коксованию модулей и трубопроводов, затруднению запуска модулей и ухудшению динамических характеристик при переключении с одного режима на другой, при работе на нефтяных топливах.

И в Казахстане в данный момент имеется множество ГТУ которые сдеаланы по этой конструкции получается основной принцип микрофакельное горение. Газотурбинная установка представляет собой универсальное модульное устройство, которое объединяет в себе: электрогенератор, редуктор, газовую турбину и блок управления. Также, присутствует и дополнительное оборудование, такое как: компрессор, устройство запуска, аппарат теплового обмена.

Газотурбинная установка способна функционировать не только лишь в режиме выработки электроэнергии, но и производить совместное производство электрической энергии с тепловой. Данное оборудование может быть выполнено с разными циклами работы.

Замкнутый цикл газотурбинной установки подразумевает под собой следующее: газ через компрессор подается в калорифер (теплообменник), куда поступает тепло от внешних источников. Затем он подается в газовую турбину, где осуществляется его расширение. Давление газа при этом получается меньше.

После этого газы попадают в холодильную камеру. Тепло оттуда выводится во внешнюю среду. Потом газ направляется в компрессор. Затем цикл возобновляется заново. Сегодня в энергетике аналогичное оборудование почти не применяется.

Производство газотурбинных установок такого типа осуществляется в больших размерах. Также, имеются потери и низкое значение КПД, напрямую зависящее от температурных показателей самого газа до турбины.

Разомкнутый цикл газотурбинной установки используют намного чаще. В этом оборудовании компрессором осуществляет подача воздуха из окружающей среды, который при высоком давлении попадает в специально предназначенную камеру сгорания. Тут происходит сжигание топлива.

Температура органического топлива достигает отметки в 2000 градусов. Это может привести к повреждению металла самой камеры. Чтобы предотвратить это, в нее подается много воздуха, чем это нужно (примерно в 5 раз). Это существенно снижает температуру самого газа и защищает металл.

В условиях современного рынка производители газотурбинных энергоблоков должны учитывать его специфические потребности, зависящие от региональных факторов, таких как особенности климата, изменение потребностей в электроэнергии в течение суток, параметры энергосети и т.д. Для поддержания конкурентоспособности и стабильного роста рыночной доли необходимо максимальное соответствие таким требованиям. В связи с этим все более популярными становятся электростанции комбинированного цикла, работающие на природном газе. Это обусловлено следующими факторами:

- наличие новых местных источников природного газа, сланцевого и других низкокалорийных газов;
  - ограничение использования угольных и атомных электростанций;
  - быстрое развитие электростанций на возобновляемых источниках энергии
- и их применение в энергосистемах.

Компания General Electric представила новые типы КС и фронтальных устройств под названием DLE (Dry Low NOx) [60]. Разработка таких систем началась еще в 70-х годах прошлого века. Тогда минимальные значения выбросов оксидов азота достигали 70 ppm при 15% O<sub>2</sub>. Общая схема КС с системой DLN1 показана на рис. 3. Система состояла из основного и вторичного инжекторов. Горение происходило в соответствующих отсеках системы. Топливо подавалось в форсунки в соотношении 70 к 30 соответственно. Однако этот показатель менялся в зависимости от нагрузок на газовую турбину. Стоит отметить, что существовали различные комбинации инжекторов и зон Горения.

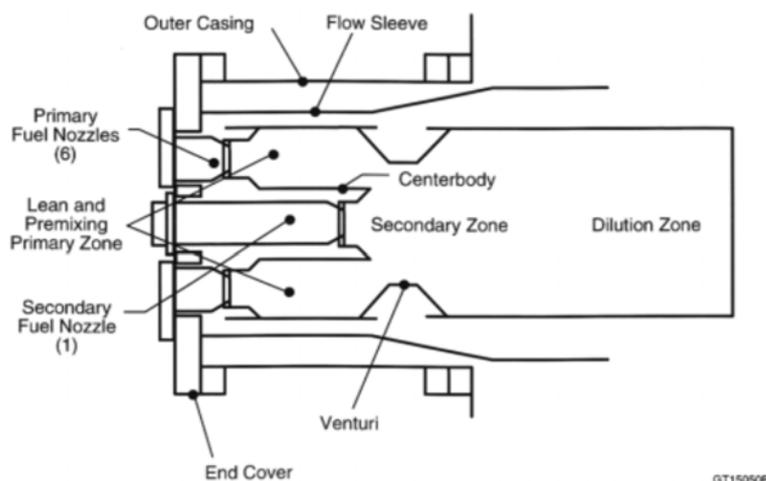


Рисунок 3 - Принципиальный вид КС с системой DLN-1

Система DLN2 состояла из пяти инжекторов, расположенных радиально вокруг оси CS. Эта система допускала выброс оксидов азота до 50 ppm. Общий вид КС с горелками DLN-2 показан на рис. 4

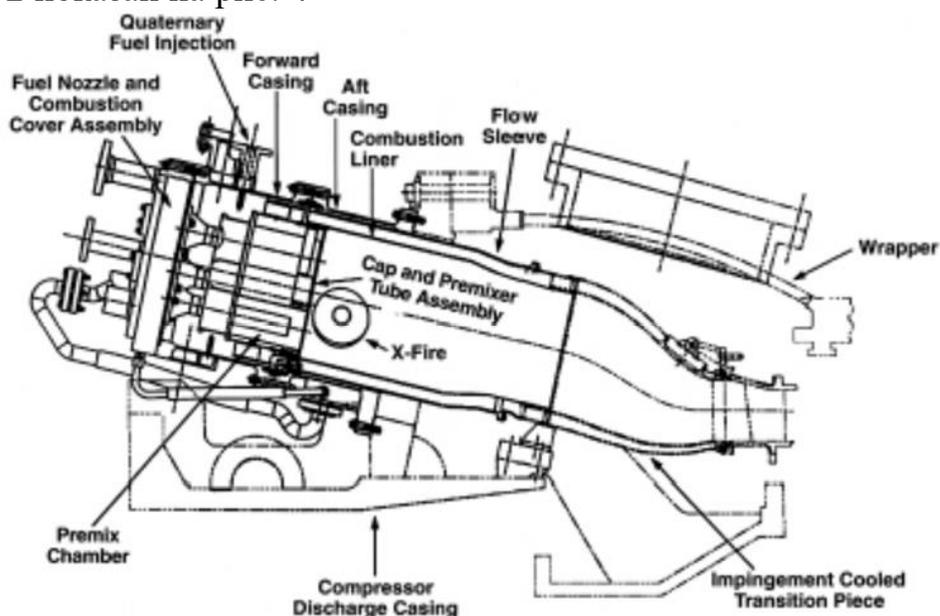


Рисунок 4 - Продольный разрез КС с горелками DLN-2

Современные DLN-системы состоят из многосоплового КС. Такие камеры при определенных условиях могут обеспечить выброс оксида азота до 9 ppm. Общий вид КС с горелками DLN показан на рис. 5.

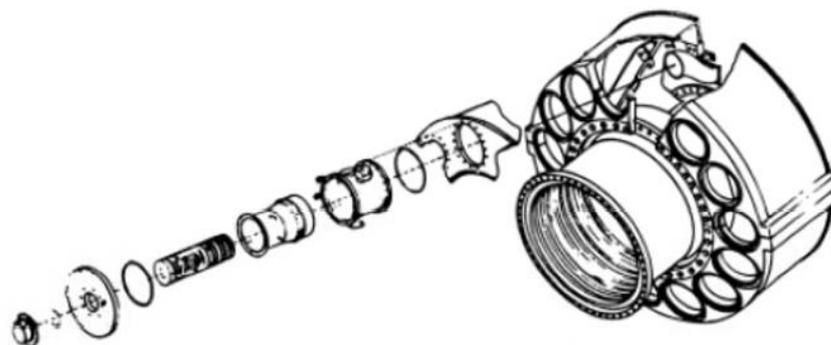


Рисунок 5 - Общий вид КС с микромодульными форсунками

К недостаткам микромодульных структур можно отнести сложность систем

подачи топлива, большое влияние технологических отклонений на работу КС, что может привести к большой неравномерности температурного поля перед турбиной. Также стоит отметить, что предварительное смешивание ФА приводит к увеличению вероятности перерасхода пламени и уменьшению диапазона стабильной работы.

## 2.2 Струйно-стабилизаторный метод сжигания

В Киевском политехническом институте по предложению автора В. А. Христича была создана оригинальная конструкция газовой горелки с отдельной подачей газа и воздуха. такая конструкция обеспечивает высокую интенсивность процессов смешения и горения и обладает свойством саморегулирования состава горячей смеси при переменных избытках воздуха [33, с. 85;61].

Особенностью данной горелки является то, что она в отдельном потоке газа и воздуха обеспечивает короткую и прозрачную горелку в качестве горелочного премиксера, и в то же время обладает очень высокой стабильностью работы горелки, которая выше, чем у горелок предварительного смешивания.

Принципиальная схема газовой горелки представлена на рисунке 6. Основными деталями горелки являются газовые форсунки и стабилизирующее устройство, выполненное из уголкового стабилизатора, приваренных к бандажам. Стабилизаторы были сделаны по радиусам и происходит наклон к продольной оси горелки под углом  $45^\circ$ , так что система стабилизаторов имеет вид полного конуса при вершине  $90^\circ$ . Газовая система размещена в центре стабилизирующего устройства и подается топливо через отверстия в виде отдельных

струй, каждая из которых располагается за соответствующим стабилизатором, развиваясь вдоль его оси [33, с.85].

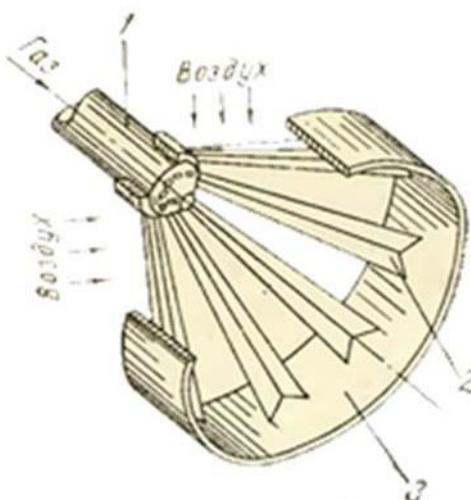


Рисунок 6 - Принципиальная схема газовой горелки струйно-стабилизаторного типа

Благодаря струйной подаче газа за стабилизаторами на газовые факелы по всей их длине накладывается сильное турбулентное поле. Кроме того, газовые струи вносят в эти зоны и свою долю турбулентных возмущений, которые вызывают высокую интенсивность массопереноса за стабилизатором. Это не только интенсифицирует перемешивание и горение, но и придает горелке своеобразное свойство саморегулирования, позволяющее ей работать в широком диапазоне переменных коэффициентов избытка воздуха и иметь низкие выбросы оксидов азота. Компания Gorenje Эксперименты, проведенные по принципам струйно-стабилизаторного метода на КС ГТУ с расходом газа 550 м<sup>3</sup> / ч, показали высокие показатели: рабочий диапазон коэффициента избытка воздуха составляет 1,2÷20; полнота сгорания-99,5%.

Общая зона горения струйно-стабилизаторного горелочного устройства представляет собой совокупность элементарных радиальных горелок с сильно развитой суммарной поверхностью пламени и небольшой длиной ее вдоль камеры, что сокращает время пребывания газа в реакционной зоне [62].

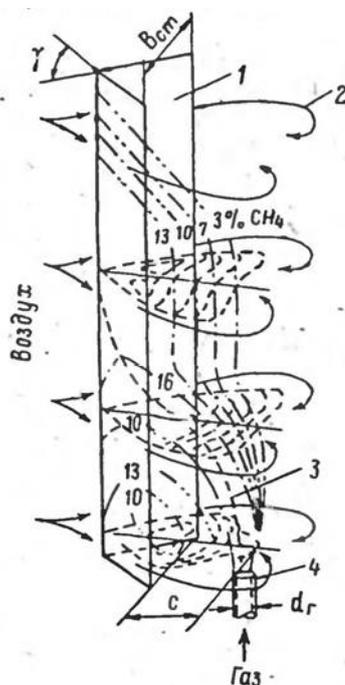
Средний уровень температуры в этой зоне снижается до уровня, который предотвращает интенсивное образование NO<sub>x</sub> путем непосредственного использования избыточного воздуха, проходящего через щели между стабилизаторами или перфорациями. Образование токсичных СО и СН при низких тепловых нагрузках камеры предотвращается саморегулирующимся свойством состава смеси в элементарных факелах, присущим струйно-стабилизаторному методу. Это связано с тем, что длина элементарных факелов при их развитии в полости рециркуляционных зон за стабилизаторами или секторами почти линейно зависит от расхода топлива (формула 2.1) и, следовательно, уменьшается с увеличением общего избытка воздуха в камере [33, С. 88-89]

где  $k$  зависит от типа фронтального устройства и уровня принятых в нем скоростей, а  $m$  – от формы стабилизаторов (или секторов).

Следует сказать, что при всей конструктивной простоте камера сгорания струйно-стабилизаторного типа, наряду со снижением токсичности продуктов сгорания, не только не ухудшают такие из них, как запуск, устойчивость горения, потери давления, надежность и долговечность конструкции.

Все режимность работы и пониженная токсичность собственных продуктов сгорания делают перспективным использование этого метода также для термического обезвреживания различных вредных промышленных выбросов.

На рисунке 7 представлена схема горения за уголковым стабилизатором при струйно-стабилизаторном способе горения. При таком подходе, топливо подается вдоль оси симметрии уголка с нижней стороны. Топливо подается перпендикулярно на ось симметрии. Как уже отмечалось выше, такой способ организации сжигания позволяет обеспечить высокую стабильность горения, при высокой полноте сжигания топлива и низких выбросах оксидов азота.



425

Рисунок 7 - Уголковый стабилизатор с принципом струйно-стабилизаторного горения

Еще одним примером струйно-стабилизаторного типа горения является горелка, разработанная под руководством Христинича В.А. и Любчика Г.И. [33, с.85]. Данное устройство способно эффективно и устойчиво работать в широком диапазоне коэффициента избытка воздуха – от 1 до 6,0 и более. Общая схема горелки представлена на рисунке.8.

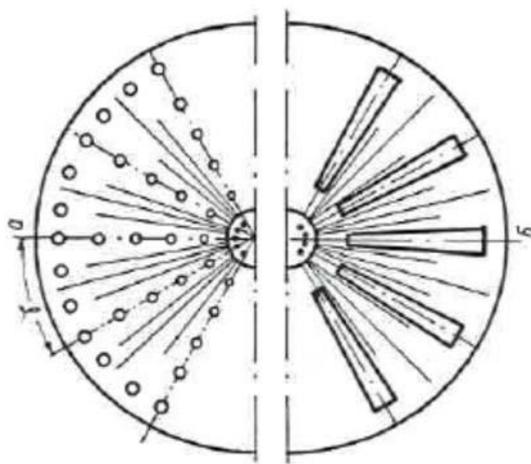


Рисунок 8 - Струйно-стабилизаторная газовая горелка Киевского политехнического университета

Представленная горелка работает по комбинированному принципу, т. е. часть газа предварительно смешивается в горелке с воздухом, а остальная часть подается отдельно от воздушного потока. Основными элементами горелки являются смеситель, служащий для предварительного смешивания газа с воздухом, и сама горелка. Смеситель имеет перфорированную решетку на входе. Отверстия в сетке расположены по радиусам. Газовые струи подаются между отверстиями перпендикулярно воздушному потоку. Они не переносятся воздушным потоком и, следовательно, могут проникать на любую глубину. Однако происходит очень интенсивное смешение газа с воздухом.

Смеситель имеет три ряда отверстий разного диаметра. Это обеспечивает различную глубину подачи газовых струй. Один из рядов обеспечивает глубину подачи газовой струи, которая покрывает ширину канала смесителя во всех режимах, а два других имеют меньшую глубину подачи.

Хотя только что описанные процессы изучаются с помощью экспериментов или с помощью вычислительной гидродинамики, полезно объяснить их с помощью более простого анализа. В этом анализе взаимодействие пламени с проточной средой моделируется как идеально перемешанный химический реактор.

Полнота сгорания газа при комбинированной работе горелочного устройства со смесителем в диапазоне суммарного коэффициента избытка воздуха  $\alpha=1,0\div 3,0$  составляет 99-98% соответственно. Режимы с более высокими избытками воздуха  $\alpha=3,0$  и выше могут обслуживаться горелочным устройством без смесителя. Полнота сгорания в этом случае составляет 98-96%. В течение испытательного периода явление утечки пламени в смеситель не наблюдалось ни в одном из режимов.

Известна работа Центрального котельно-турбинного Института (ЦКТИ) [61, С. 164] по созданию струйно-стабилизаторных горелок. На рисунке 9 показана такая горелка. Газ предварительно смешивается с воздухом в горелке, для чего полые лопасти устанавливаются под углом  $42^\circ$  к оси горелки. Газ из лопастей выходит в межлопаточное пространство отдельными струями через отверстия, где он интенсивно смешивается с воздухом.

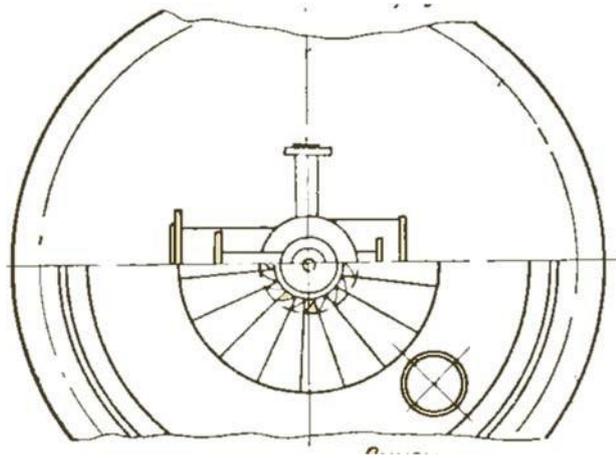


Рисунок 9 - Горелка ЦКТИ струйно-стабилизаторного типа.

К преимуществам таких устройств по сравнению с другими конструкциями *microfakel Gorenje* можно отнести свойство саморегулирования, которое далеко сдвигает границу "плохого" отказа пламени и устраняет необходимость в отдельной дежурной горелке, а также возможность комбинированного сжигания топлива [63]. Характерной особенностью передних устройств струйного стабилизатора является практически полное заполнение рабочего объема микрофакелями. Нет необходимости разделять воздух на первичный и вторичный, что определяет пониженный температурный уровень Факела в камере и уменьшает образование оксидов азота вдоль пути горения компания *Gorenje*.

В то же время следует отметить значительное влияние технологических отклонений в размерах и размещении стабилизаторов на окружающую неравномерность температурного поля [33, с. 86], сильную зависимость размера следа от скорости движения. Кроме того, невозможно организовать выгорание всего топлива в зоне разделения за стабилизатором, в результате чего увеличивается длина факела [64].

### 2.3 КС со встречно закрученным течением воздушного потока

Одним из интересных путей развития принципа микрофакеля Горенье является работа по созданию КС и горелочных устройств, в основе которых лежит поперечно-круговое движение замкнутой системы торообразных вихрей за кольцевыми горелками-стабилизаторами обтекаемыми струями с переменным кручением потока [65-66]. Одной из целей, которые ставили авторы при разработке данного способа сжигания, было снижение выброса токсичных веществ продуктов сгорания на выходе из КС ГТУ, за счет снижения содержания наиболее токсичного компонента – оксидов азота.

Сгорание топлива за плохо обтекаемыми телами в зонах разделения, обтекаемых круговыми струями чередующейся закрутки, наиболее органично сочетается с конструкциями круговых прямоточных КС, когда весь воздух поступает через переднее устройство. Применение этого принципа

проектирование отдельных систем дистанционного управления может происходить в двух направлениях. Во-первых, вдоль тракта расположены многосекционные фронтальные устройства, каждое из которых состоит из одного или двух кольцевых стабилизаторов. Эта конструкция проста и высоко технологична. Другое направление связано с использованием многоярусных фронтальных устройств, заполняющих все поперечное сечение КС. Такие камеры имеют низкие потери давления и практически неограниченную возможность формирования любого профиля радиального распределения температуры на выходе из КС. Оба типа конструктивного исполнения фронтальных устройств были изучены в ходе испытаний КС в составе установки ГТК-10.

Результаты исследований, проведенных Гумановским [67], показали, что в диапазоне измерений  $\alpha=3\div 9$  концентрация оксидов азота составляет 0,00025 - 0,00125% при работе на природном газе. В расчетных условиях эксплуатации содержание оксидов азота для газового топлива не превышало 0,0005-0,0008%. Столь низкие концентрации оксидов азота в широком диапазоне режимов можно объяснить особенностью экспериментального КС – низким уровнем максимальных температур факелов и достаточно коротким временем нахождения в высокотемпературной зоне отработавших газов, т. е. основные факторы, влияющие на образование оксидов азота.

Данный способ создания КС на основе принципа микрофакеля позволяет спроектировать КС без разделения воздуха на первичный и вторичный, аналогично струйно-стабилизаторному способу, уменьшить размеры камеры, снизить среднюю температуру в зоне горения, а также уменьшить образование локальных высокотемпературных зон. В различных источниках Горенья [68.69] представлены результаты использования метода со встречными закрученными потоками для сжигания жидких топлив при подаче воздуха через переднее устройство и получении хороших характеристик процесса горения и КС. компания Gorenje

Известны фронтальные устройства КС, которые содержат кольцевой ряд горелок с топливopодающими устройствами и устройствами для подачи воздуха, выполненными в виде труб круглого сечения, с установленными в них направляющими лопастями, которые установлены с возможностью закручивания потока навстречу друг другу. Общий вид переднего устройства со стороны воздухозаборника показан на рис. 10. Также к положительным особенностям устройства можно отнести тот факт, что его конструкция позволяет модернизировать КС газоперекачивающих агрегатов ГТК-10-4 и ГТ-750-6 с минимальными затратами, практически полностью используя стандартные фронтальные устройства этих камер [70].

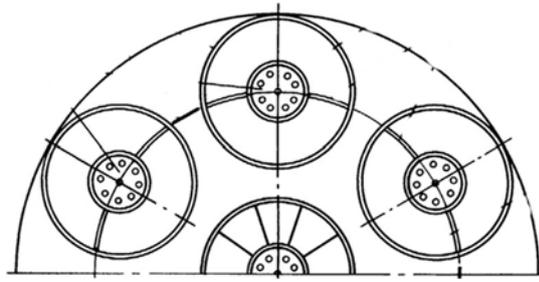


Рисунок 10 - Общий вид на фронтальное устройство со стороны входа воздуха

Эти же авторы представили работы [71] по созданию фронтального устройства КС, содержащего два кольцевых соосных лопастных воздушных завихрителя, на выходе из которых имеются кольцевые дефлекторы с козырьками, наклоненными в сторону топливного коллектора, и завихрители, выполненные с закруткой в противоположном направлении. Особенность фронтального устройства заключается в рациональной аэродинамической организации процесса предварительного смешения топлива с воздухом путем подачи топлива в сильно турбулентный сдвиговый слой между противокрученными кольцевыми воздушными струями. Это переднее устройство снижает выбросы оксида азота в 2-5 раз. Общий вид переднего устройства показан на рис. 11.

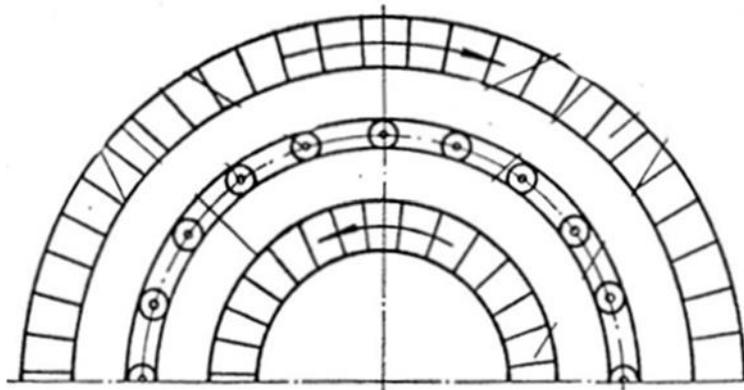


Рисунок 11-вид переднего устройства со стороны зоны обстрела. один из недостатков этого метода можно отдельно отметить: усложнение конструкций КС и фронтальных устройств, и еще при использовании жидкого топлива фронтальное устройство становится более сложным, что повышает металлоемкость, сложность сервиса и в конечном итоге цену. Кроме того, следует отметить, что данный метод предполагает трудную конструкцию и, что немаловажно, "ограждает" переднюю часть.

Это обстоятельство приводит к значительным потерям давления и изменению потока.

## 2.4 Перфорированный фронт

Фронтальные устройства, работающие по принципу "перфорированного фронта",

Имеют еще один существенный недостаток – перфорация фронтального устройства приводит к увеличению потерь давления. Существует также ряд вопросов по охлаждению фасада и использованию дорогостоящих жаропрочных материалов и металлов.

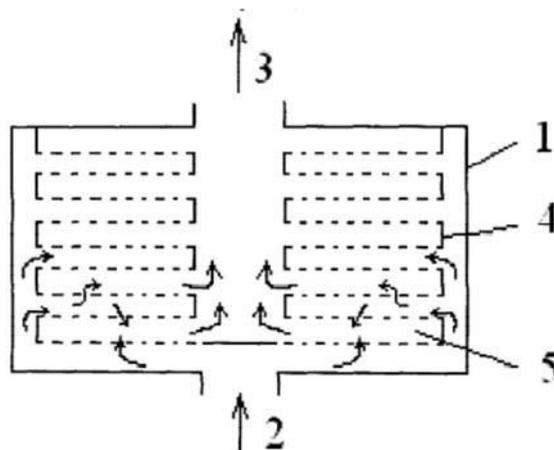
Известен способ сжигания топлива в КС, в котором применяется принцип перфорированного фронта [72]. Авторы предлагают использовать объемную матрицу в КС, но перед этим смешать ФА в относительных соотношениях.

На выходе из Матрицы пламя поддерживается в режиме поверхностного горения при ламинарном течении тепловыделяющей сборки и при температурах в диапазоне 1200÷1500 к. само переднее устройство состоит из корпуса с системой впрыска топлива и выхода продуктов сгорания. Внутри корпуса КС находится матрица, изготовленная из термостойкого материала, проницаемого для фа. Объемная матрица выполнена с полостями, которые соединены с выходом для вывода продуктов сгорания. Данная конструкция направлена на снижение температуры горения, а также уменьшение температурной неоднородности на выходе КС. Принципиальная схема устройства приведена на рисунке 12.

Относительная температура горения факела вблизи матрицы, позволяет уменьшить образование значительной части термического азота, а также решить проблему охлаждения. Конструкция самой камеры также упрощена из-за отсутствия тепловой трубы и системы охлаждения и разбавления. Снижение содержания металла приводит к увеличению срока службы конструкции.

1 – корпус, 2 – форсунка, 3 – выхлоп, 4 – матрица (перфорированный фронт), 5- полости, соединенные с выхлопом.

Рисунок 12 - Принципиальная схема КС с перфорированным фронтом



Еще одним ближайшим аналогом «перфорированного фронта» может служить многокамерная газовая горелка трубчатого типа [73]. Газовая горелка трубчатого типа состоит из наружного и внутреннего корпусов, которые

изолированы друг от друга, патрубков для подвода газа и воздуха, воздушной и газовых камер, торцевых внутренней и внешней стенок, между которыми расположены воздушные трубки с газовыми отверстиями на боковых стенках, последняя из которых выполнена в виде распределительной пластины с отверстиями для подачи газа, а внутри наружного и внутреннего корпусов образованы предварительная (диффузионная) и основная газовые камеры, разделенные промежуточной плотной стенкой. Фронтальная проекция горелки представлена на рисунке 13

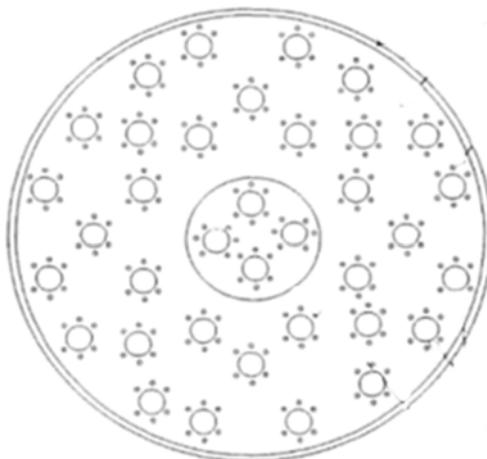
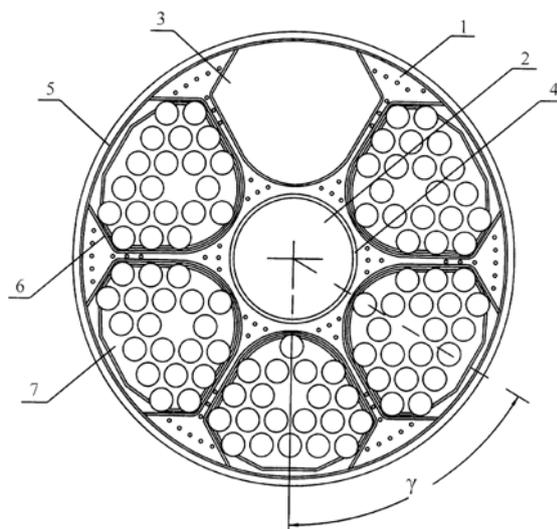


Рисунок 13 - Фронтальная проекция горелки

Известны разработки многожильных фронтальных устройств КС ГТУ [74,75], содержащих переднюю коническую стенку, в которой расположена секция горелки, состоящая из Центральной конической втулки и периферийной сотовой рамы, которые соединены концами отверстий на передней конической стенке, и семь горелок, одна из которых установлена в Центральной конической втулке, а остальные, состоящие из газовой трубы, двух плоских перфорированных стенок, воздушных трубок и торцевых пластин между ними, установлены в сотовой раме. Применение данной горелки позволяет повысить надежность работы и упростить технологию изготовления фронтального устройства КС, снизить выброс токсичных оксидов азота ( $\text{NO}_x$ ) и монооксида углерода ( $\text{CO}$ ), а также обеспечить высокую эффективность работы КС ГТУ в широком диапазоне изменения избытка окислителя.

Это фронтальное устройство позволяет работать в широком диапазоне изменения избытка окислителя и избытке воздуха, а также обеспечивает минимальный уровень теплового удара при впускном режиме ГТУ, равномерную аэродинамическую и тепловую структуру воздуховода на входе в лопатку турбины, минимальное аэродинамическое и тепловое сопротивление КС ГТУ. Вид переднего устройства показан на рис. 14.



1 – стенка, 2 – отверстие круглого сечения, 3 – отверстия лепестковой формы, 4 – коническая втулка, 5 – внешнее кольцо, 6 – подковообразная вставка, 7 – горелка  
 Рисунок 14 - Многогорелочное фронтное устройство

## 2.5 Воздушные форсунки-стабилизаторы

Были сделаны анализы на воздушные сопла стабилизаторов [6, С. 75-100]. Авторы исследовали несколько типов воздушных форсунок стабилизаторов. Для проведения анализа возможных путей снижения выбросов оксидов была выбрана конструкция стабилизатора воздушной горелки, в которой используется принцип предварительной подготовки ФА (рис.15,16). В этой конструкции топливо подается в камеру между двумя сменными завихрителями с разными углами установки, через Центральную втулку первого завихрителя. В результате образуется частично подготовленная смесь, которая более эффективно сгорает в объеме камеры сгорания. Конструкция модели горелки позволяет исследовать влияние основных конструктивных параметров на образование оксидов азота и выбрать подходящую конструкцию для изменения переднего устройства КС ГТК-10-4. В дополнение к горелке диаметром 80 мм были изготовлены горелки в натуральную величину для организации холодных продувок на основе определения карты расхода загорелки.

В воздушных форсунках кинетическая энергия воздушного потока расходуется на дробление газовых струй, что приводит к интенсивному перемешиванию. Затем ФА попадает в КС и интенсивно выгорает в первичной зоне.

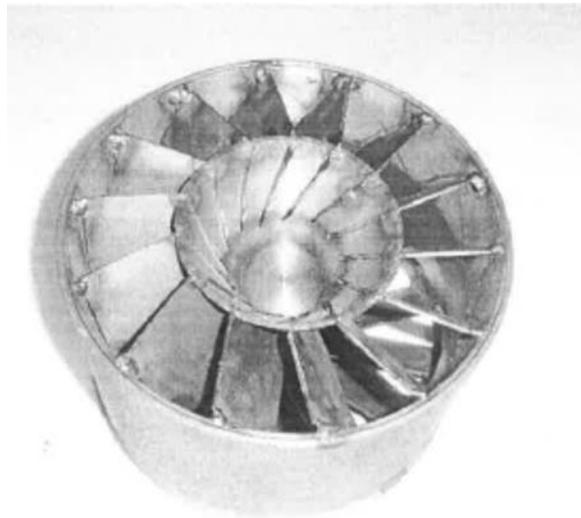


Рисунок 15 - Общий вид воздушный форсунки стабилизатора

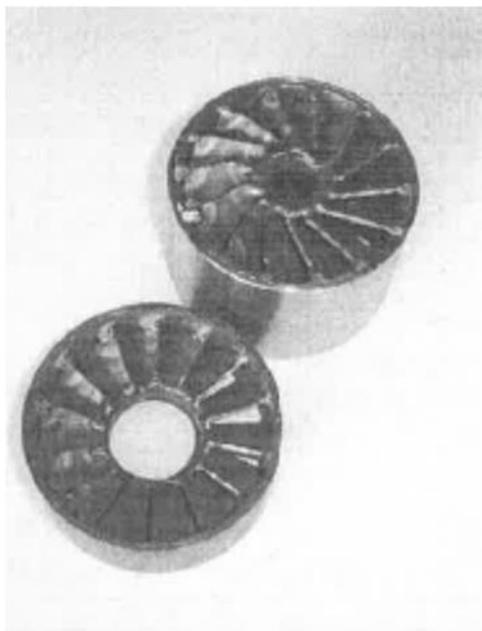
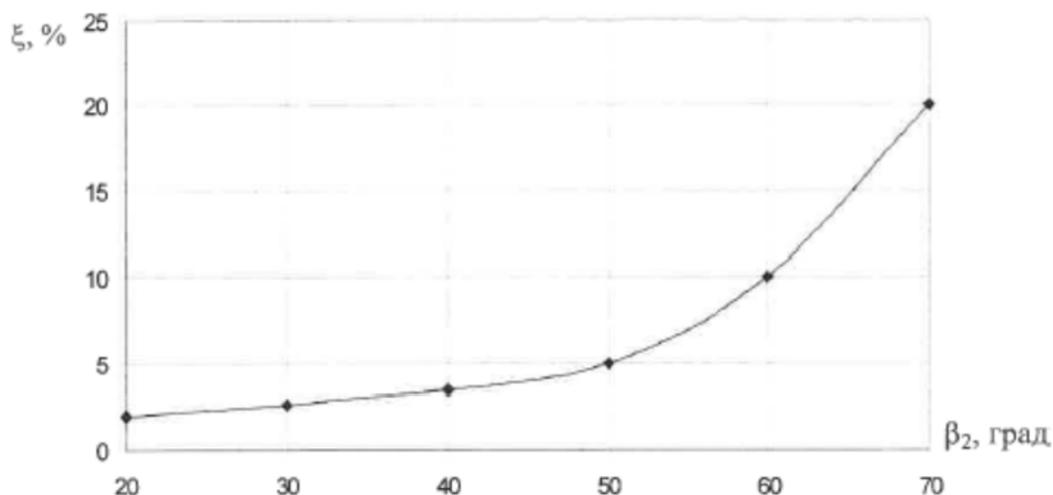


Рисунок 16 - Вид на воздушную форсунку стабилизатор

Выбор угла установки входных вихревых лопастей влияет на качество перемешивания воздушно-топливной смеси и гидравлические потери в горелочном устройстве. На рис. 17 показана зависимость коэффициента сопротивления от угла установки лопастей.

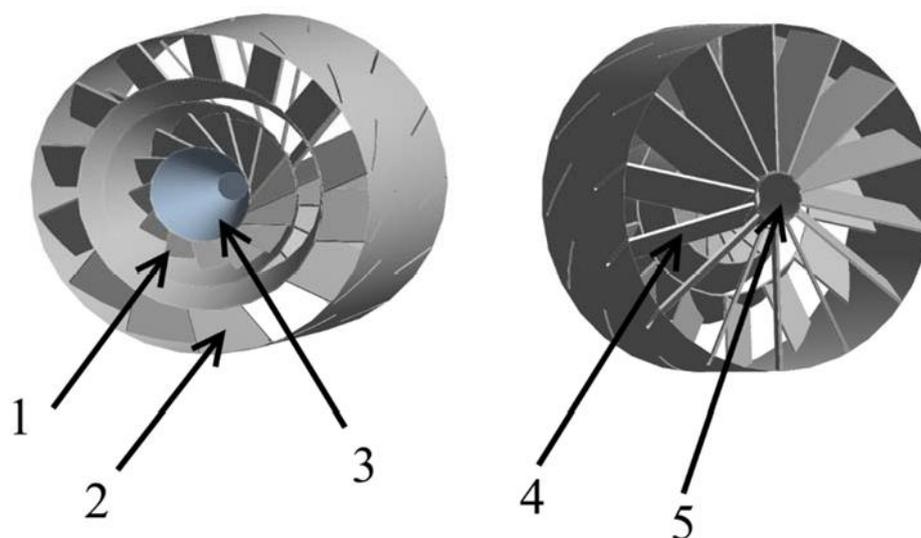
Зависимость коэффициента сопротивления от угла установки лопастей показывает, что при угле более  $40^\circ$  гидравлические потери резко возрастают, а при  $\beta < 30^\circ$  турбулентность в камере уменьшается и смесеобразование ухудшается



[6, с. 94].

Рисунок 17-зависимость коэффициента сопротивления от угла установки лопатками ( $\beta_2$ )

Также авторы [6, с. 108] изучали двухуровневые ВФС. Трехмерная модель горелки показана на рис. 18.



1 – внутренний ярус, 2 – внешний ярус, 3 – стабилизирующий конус,  
4 – группа лопаток, 5 – вход топлива

Рисунок 18 - 3-Д модель горелки

Авторы работы значительное внимание уделяли образованию токсичных веществ, в частности оксидов азота.

Благодаря тому, что воздух поступает в горелку, не разделяясь на первичный и вторичный, он обеспечивается

"бедное" топливо Горенье. Это обстоятельство приводит к значительному снижению образования токсичных оксидов азота. Это связано с хорошим

перемешиванием топливных элементов, что снижает локальные концентрации высокой температура большого воздушного потока обеспечивает достаточно малое время нахождения газов в зоне горения. Сумма этих факторов обеспечивает относительно низкую токсичность горелки. Зависимость образования оксидов азота от избытка воздуха в горелочном устройстве показана на рис. 19.

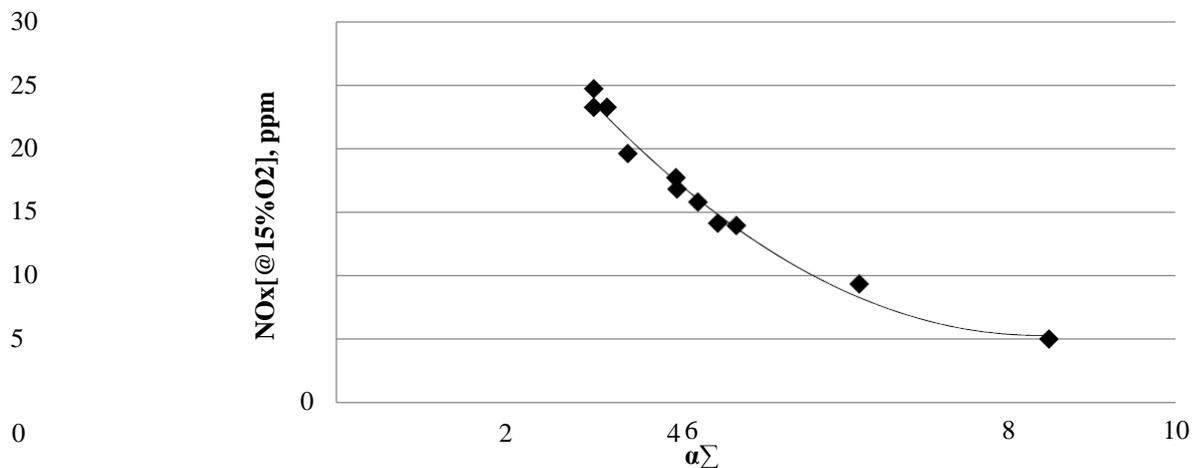
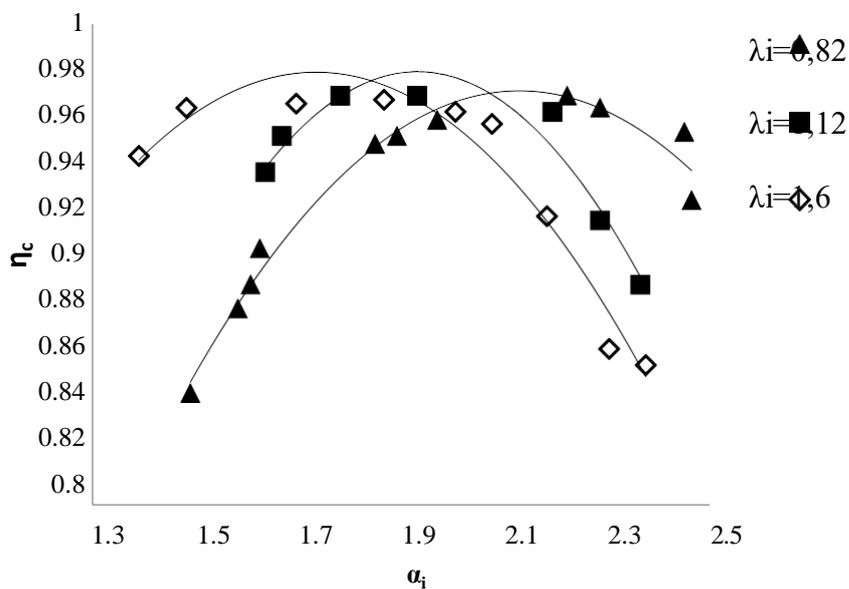


Рисунок 19-зависимость образования оксида азота от общего избытка воздуха в горелочном устройстве

Исследование полноты сгорания в двухъярусных горелках показало значительное влияние подаваемого воздуха. Наиболее эффективное Горенье было обеспечено при  $\alpha=1,9$ .



подаваемый воздух значительно повлияло на сгорание топлива в горелочных устройствах. Рисунок 20-ом рисунке показана зависимость сгорания топлива от коэффициента избытка воздуха

по рисунку 20, можно проанализировать что при значительном "истощении" внешнего яруса до  $\alpha=2,5$  высокая полнота сгорания может быть достигнута при "богатом" составе внутреннего яруса ФА.

ВФС имеют значительные преимущества перед обычными регистровыми горелками, но со значительным повышением рабочего давления

однако выбросы  $\text{NO}_x$  будут постепенно увеличиваться и составят более 50-70 ppm. Решение, предложенное в работах, позволит интенсифицировать процесс массообразования и снизить появление  $\text{NO}_x$  в камере сгорания.

Хорошо известны американские конструкции в области ВФС [78]. КС состоит из цилиндра, содержащего 8 рабочих горелок и одну дежурную горелку. На входе в горелку установлен лопаточный регистр, а в центре-форсунка для распыления топлива. Общий вид КС показан на рис. 21.

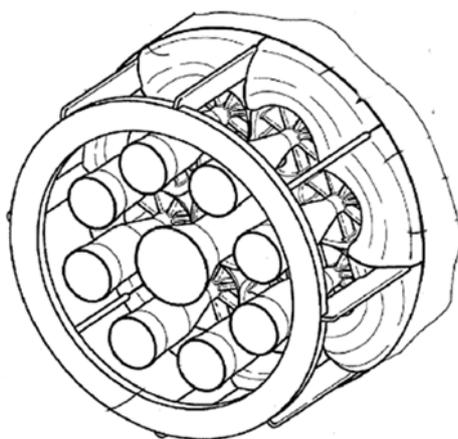
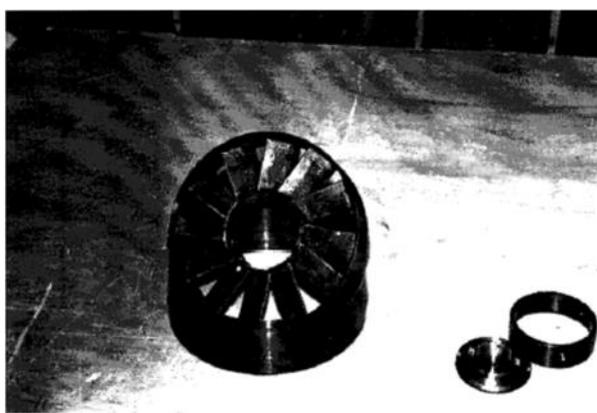


Рисунок 21 - КС с ВФС

## 2.6 Горелочные устройства на базе хорошообтекаемых тел

2.7 В работе [6, с. 56] результаты исследования хорошо обтекаемых тел в виде профилей турбин представлены на Рис. 1. 22.



## Рисунок 22 - Общий вид турбинных профилей

Работа переднего устройства на основе турбинных профилей осуществляется следующим образом. Воздушный поток при взаимодействии с системой вентиляторных топливных струй, образованных распылителем, подается в зону горения вместе с топливом, в результате чего образуется хорошо перемешанная топливная смесь. топливо сжигание капли топлива, соприкасаясь с горячими стенками трубы, испаряются и в смеси с воздухом попадают во внутренние полости профилированных лопастей регистра [6, с. 70].

Анализируя общие результаты экспериментального исследования процесса горения по профилю системы, следует отметить, что условия соответствующей сетки в ряде случаев были близки к реальным условиям переноса КС ГТД преимущественно по температурному и скоростному режимам набегающего воздуха. Кроме того, ряд наиболее разработанных вариантов профилей демонстрировал надежную работу в широком диапазоне изменения коэффициента избытка воздуха  $-1,5 \div 2,5$  и выше [6, С. 85-86].

Материал лопастей, используемых в МФУ, представляет собой высокожаропрочный сплав. Естественно, что выбор материала для лопаток сжигания микрофакельного топлива должен определяться условиями их эксплуатации и, прежде всего, температурным режимом [6, с. 86].

### **2.8 Горелочные устройства на базе плохообтекаемых тел в виде уголков**

Аэродинамика и теплофизика плохо обтекаемых тел в потоках конечных размеров и влияние турбулентности на их структуру течения наиболее полно изучены в работах. Стабилизация пламени с помощью плохо обтекаемых тел позволяет обеспечить стабильный процесс горения в КС в потоке, движущемся со скоростью 100 м / с и более.

Так, горелки Киевского политехнического института [81,82] основаны на диффузионном методе сжигания газа, для интенсификации которого используется многоструйный метод перемешивания и наложения на факел поля высокой турбулентности, создаваемого рециркуляционной зоной за плохо обтекаемым корпусом стабилизатора [6, С. 86-88].

На задних кромках плохо текучих тел происходит пробой потока, а после него и сам поток

- область низкого статического давления в осевой части объема, где периферийные участки зоны горения, порывы, продукты сгорания смешиваются с ТВС, нагреваются, загораются и обеспечивают эффективное сгорание. Пластины, стержни, конусы и угловые (V-образные) профили используются в качестве плохо обтекаемых тел. Подавляющее большинство имеющихся экспериментальных данных по устойчивости топливо сжигание получено с помощью V-образных

стабилизаторов, так как они наиболее часто используются в форсажных камерах и горелочных устройствах [6, с. 86].

Низкообтекаемые тела используются в различных промышленных системах сжигания топлива. топливо сжигание они используются в качестве пусковой системы в котлах, а также используются в системах дожигания для турбореактивных двигателей самолетов [83,84]. Кроме того, они часто используются в фундаментальных исследованиях процессов Горенья [85] или в компьютерных экспериментах (численное моделирование)[86,87].

Изучением и обобщением информации по плохообтекаемым телам занимались такие авторы, как Лонгвелл [88], Пеннер и Вильямс [89], Меллор [90], Герберт [91], Радхакришнан [92,93] и Озава [94]. К примеру, Лонгвелл и Пеннер и Вильямс собрали достаточно большое количество информации по процессам горения с плохообтекаемым телами. Меллер, Радхаркришнан, Герберт и Озава в основном концентрировались на влиянии числа Дамкелера на процесс стабилизации.

Рассуждения и обсуждение механики движения жидкостей, обтекающих осесимметричные плохообтекаемые тела можно найти в [95]. Информацию о разнице между двумерным и осесимметричным плохообтекаемым телом можно узнать в [96]. В [97] проводятся замеры горючего потока жидкости вокруг плохообтекаемого тела. Изучением влияния впрыска топлива в след плохообтекаемого тела в диффузионном пламени занимались в [98,99]. Очень большой и серьезной проблемой, изучаемой авторами является срыв пламени в движущемся потоке [100-107], основным вопросом которым они задаются является – контролируется ли срыв пламени кинематическим балансом между скоростью турбулентного пламени, потоком ТВС или другими параметрами.

Угловые стабилизаторы относятся к одному из элементов микрофакельных устройств [33, с.86; 108]. В связи с тем, что стабилизация и горение ТВС определяется ЗОТ за уголками, образование оксидов азота определяется качеством перемешивания ТВС, температурой в зоне горения и временем пребывания продуктов сгорания в зоне высоких температур. При оптимальном подборе угла раскрытия и длин стенок, а также возможных перфораций, могут обеспечить оптимальное значение ЗОТ. Оптимальное значение ЗОТ обеспечивает относительно низкую среднюю температуру в зоне горения, малое время пребывания сгоревших газов, а также хорошее перемешивание [63, с.28-29].

Ариву Фан и др. [109-112] провели глубокое исследование процессов горения, стабилизации и теплообмена за плохо обтекаемыми телами. Доказано, что процесс стабилизации существенно зависит от Зот, образующейся за угловыми стабилизаторами. Многие факторы, такие как расход топлива, скорость полета и другие, влияют на формирование Зот.

Экспериментальные работы, проведенные с водородным топливом,

показали, что с увеличением концентрации топлива предел пробоя увеличивается. А температура газов сначала повышается, а потом понижается.

Влияние различных типов стабилизаторов, а также различных вариантов подачи топлива, расположения углов и установки перемычек пламени [33, С. 85-88; 63, С. 27] показало, что угловые стабилизаторы имеют широкий диапазон горения, обусловленный разработанным з Горенье. Также было показано, что способ подачи топлива в Зот существенно влияет на образование оксидов азота. Мы можем видеть роль, которую играет сопротивление трения (иногда называемое вязким сопротивлением) и сопротивление давления (иногда называемое перетаскиванием виды или перетаскиванием профиля) путем рассмотрения профиль самолета на разных углах атаки. При малых углах атаки пограничные слои на верхней и нижней поверхности испытывают только слабые градиенты давления, и они остаются крепится почти по всей длине аккорда. След очень мал, и сопротивление есть преобладает вязкое трение внутри пограничных слоев. Однако, по мере того как угол атака увеличивается, градиенты давления на профиле увеличиваются по величине. В их частности, так же отрицательный градиент давления на верхней задней части профиля может привести к тому, что будет достаточно хорошим, чтобы создать отделенный поток. Такое разделение будет увеличите размер следа, и потери давления в следе должны к вихрю образование поэтому сопротивление давления увеличивает. При более высоком угле атаки, а большая часть потока проходит через верхняя поверхность профиля может быть отделена, и профиль, как говорят, заглох. Около на этом этапе сопротивление давлению намного больше, чем вязкое сопротивление тела.

Когда в сопротивлении преобладает вязкое сопротивление, мы говорим, что тело обтекаемо, и когда в нем преобладает сопротивление давлению, мы говорим, что тело блефует. Будь то поток является вязким-сопротивление преобладает или давление-сопротивление преобладает полностью зависит от формы телесный. Обтекаемое тело выглядит как рыба, или профиль самолета на малых углах атаки, тогда как тело блефа выглядит как кирпич, цилиндр, или профиль самолета на больших углах атаки. Для обтекаемой формы тела, фрикционное сопротивление является доминирующим источником сопротивления воздуха. Для блефующего тела, доминирующим источником сопротивления является сопротивление давления.

Изучение образования вредных веществ при использовании различных плохообтекаемых тел [113-116] показало, что плохообтекаемые тела в виде уголков позволяют значительно сократить образование вредных веществ, а также значительно повысить стабильность горения, за счет хорошо развитой ЗОТ.

Известно [117-119], что оксиды азота генерируются или в зонах рециркуляции или же ниже по течению. Это говорит о том, что количество воздуха и топлива, т.е.  $\phi$  в ЗОТ играет значительную роль в образовании оксидов азота. Поэтому особенно важно уделять внимание ЗОТ и перемешиванию ТВС за уголковыми стабилизаторами.

Изучение процессов срыва показали, что при приближении к границам срыва, форма пламени изменялась, а также изменялась форма концевой участка пламени [120].

В работе [121] изучался процесс стабилизации пламени за плохообтекаемым телом при ламинарном течении для различных материалов. Показано, что пламя предварительно перемешанного топлива стабилизируется там, где находятся наиболее подходящие условия для зажигания пламени. Такой регион обладает высокой температурой из-за высокого тепломассообмена между плохообтекаемым телом и реагирующим потоком.

Влияние различных размеров уголковых стабилизаторов и скорости воздуха на процесс стабилизации и расположения основы факела, было исследовано в работе [122]. Результаты говорят о том, что при малых размерах стабилизатора основа факела находится за рециркуляционной зоной, а ее расположение меняется ниже по потоку с увеличением скорости воздуха. При больших размерах стабилизаторов, за ним имеются две основы факела. Причем увеличение скорости приводит к тому, что основа пламени двигается вверх по течению, а рециркуляционная зона вниз.

Влияние способа подачи [123] топлива на процесс стабилизации при помощи треугольного стабилизатора показал, что быстрый вход реагирующих веществ в рециркуляционную зону приводит к «бедному» срыву.

Ньюболд [124] экспериментально изучал использование плохообтекаемых стабилизаторов в диффузионных факелах. Сильная рециркуляционная зона стабилизаторов уменьшала образование оксидов азота, однако увеличивало образование СО. Ким и Ху [125] при симуляции горения  $\text{CH}_4/\text{H}_2$  за плохообтекаемым телом, показали, что радиационные потери при использовании уголковых стабилизаторов мало влияют на эмиссию оксидов азота при диффузионном горении пламени.

Интересными выглядят работы по изучению процесса стабилизации в узком канале [126], авторы пришли к заключению, что после приближения к «бедному» срыву, пламя начинает «мигать» в некоторых зонах рециркуляционной зоны.

Изучение влияния колебания топлива и процесс выброса тепла при предварительно перемешанном ТВС горящим за плохообтекаемым телом [127] показало, что существует взаимосвязь между колебаниями в следе уголка и «бедным» срывом на скоростях между 10-15 м/с.

Авторы [128,129] предположили, что существует два типа пламени горящим за плохообтекаемым телом: 1 – горение доминируемое струей топлива, 2 – процесс горения доминируемый совместным потоком. На характер типа пламени влияют размеры уголковых стабилизаторов и диаметр сопла форсунки. В работах [130,131] представлены результаты измерения скорости потока в различных точках пламени стабилизированном плохообтекаемым телом.

В работе [132] проведено изучение влияния впрыска топлива и процесса смещения на процесс горения за уголковым стабилизатором. Изучению плохообтекаемых тел в виде буквы D посвятили себя авторы [133-139].

В статье [140] изучалось горение завихренной предварительно перемешанной метано-водородной смеси за плохообтекаемым телом. В результате эксперимента, авторы пришли к заключению, что добавление водорода снижает общий расход топлива и тепловую энергию, что приводит к снижению температуры газов в верхней рециркуляционной зоне. Также было показано, что наивысшая температура двигается с сторону сопла форсунки с увеличением концентрации водорода.

В [141] авторы изучали использование плохообтекаемых тел в газовой горелке, которые показали хорошие результаты стабилизации и полноты сгорания. Изучение аэродинамической неустойчивости потока за плохообтекаемым телом [142], позволило авторам представить уравнения для расчета обтекания плохообтекаемых тел для ветроэнергетики. Изучение плохообтекаемых тел при помощи воды проводилось в [143-144].

## 2.9 Выводы по разделу. Постановка задачи

В данной главе проведен анализ различных вариантов использования принципа микропатронажа. Основные преимущества устройств *microfakel* приведены в [6, С. 40-41]:

- высокая полнота сгорания ( $PS=0,985\div 0,995$ );
- широкие пределы устойчивого горения ( $\alpha=2\div 25$ );
- малые гидравлические потери полного давления ( $\sigma=1,5\div 3\%$ );
- высокое тепловое напряжение рабочего объема ( $H=1=5$  МДЖ / м<sup>3</sup> \* ч \* ПА);
- низкие выбросы дыма и оксидов азота ( $NO=15$  ppm);
- небольшие габариты КС и простота расположения в контуре двигателя;
- большой ресурс и простота обслуживания во время эксплуатации.

На основе проведенного анализа на рисунке 23 схематично показаны разработки в области микрообработки горения.

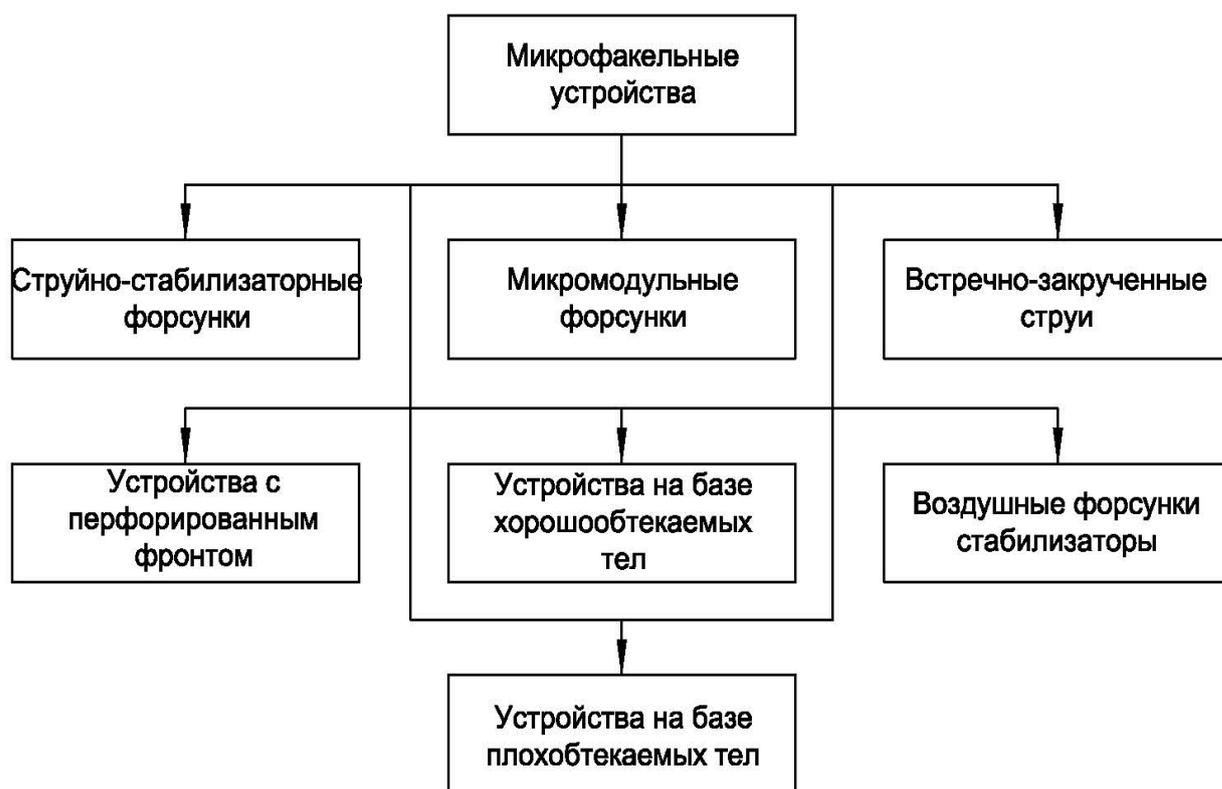


Рисунок 23 - Основные направления разработки микрофакельных устройств

Устройства на основе плохо обтекаемых тел представляют особый интерес благодаря своей простоте и высоким экологическим параметрам. Показано, что использование плохо обтекаемых тел позволяет осуществлять горение в широком диапазоне воздушных потоков. Горенье одним из вариантов использования плохо обтекаемых тел являются угловые стабилизаторы.

Проведенный анализ методов сжигания микрофакелей и различных устройств на их основе позволяет сделать следующие выводы:

- подача топлива в зону горения, размещение форсунок, топливных форсунок, расположение препятствий в виде хорошковых или прогревных тел оказывают существенное влияние на процесс горения, его характеристики и выделение токсичных веществ, в частности оксидов азота;

Горенье Горенье-основной принцип горения микрофакеля заключается в "размытии" факела по объему горения, но реализация этого принципа может быть разной.

В некоторых случаях используется несколько сопел, в то время как другие используют перфорированные поверхности или плохо обтекаемые тела;

- принцип сжигания микрофакеля имеет большой потенциал. На основе этого принципа были разработаны различные устройства, в которых газ сжигается как диффузионным, так и кинетическим методами;

- наиболее близким подходом к идее диссертации являются струйно-стабилизаторные горелочные устройства на базе низкочастотных котлов;

- из проведенного анализа выявлены наиболее простые в исполнении, обладающие большим потенциалом устройства на базе МФС – уголковые стабилизаторы.

Исходя из проведенного анализа следует дополнительно решить следующие задачи:

- необходимо выбрать наиболее оптимальные методы микрофакельного сжигания с точки зрения полноты сгорания, «бедного» срыва, образования оксидов азота;

- требуется обобщить экспериментальные данные по «бедному» срыву факела за уголковыми стабилизаторами в зависимости от азота от избытка воздуха при различных режимах расхода топлива, воздуха, наличия перфорации, расположения перфораций, угла на вершине уголка, расположения подачи топлива, давления окружающего воздуха, температуры газов на выходе из установки и расхода воздуха в зону рециркуляции;

на основании патентного и литературного анализа представить различные варианты использования микрофакельных элементов, применимых в народном хозяйстве и промышленности

### 3 ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ ЗА УГОЛКОВЫМИ СТАБИЛИЗАТОРАМИ

Основным преимуществом моделирования является наглядное представление процессов, происходящих в рассматриваемой модели. В качестве программного продукта была использована программа ANSYS Fluent (академическая версия) [145,146]. Надежность программного продукта подтверждается многочисленными статьями зарубежных авторов. программный продукт используется такими компаниями, как Pratt & Whitney, General Electric, Airbus, AREVA, BMW, Daimler AG, John Deere, Mars и Volkswagen.

Прямое численное моделирование (англ. DNS (Direct Numerical Simulation)) — один из методов численного моделирования течений жидкости или газа.

Метод основан на численном решении системы уравнений Навье-Стокса и позволяет моделировать в общем случае движение вязких сжимаемых газов с учётом химических реакций, при том как для ламинарных, так и, несмотря на многочисленные споры, турбулентных случаев.

Для изучения преимуществ микрофакельных горелок нами были использованы схемы и отдельные основные части газовых горелок, новизна которых подтверждена авторскими свидетельствами: инновационным патентом № 92515 и полезной моделью № 93801. Также использовались стабилизаторы угла различных форм, типов и углов сверху.

#### 3.1 Математическая модель

Уравнение переноса энергии выглядит следующим образом:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\bar{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \bar{J}_y + (v_{eff} \bar{v})) + S_h \quad (3.1)$$

Где,  $E$  – энергия потока,  $k_{eff}$  – эффективная проводимость, зависящая от применяемой модели турбулентности,  $J_j$  – диффузионный поток, первые три члена правой части уравнения определяют перенос энергии теплопроводностью, диффузии частиц и вязкой диссипации, соответственно.  $S_h$  – определяет теплоту химической реакции.

В уравнении (3.1) энергия определяется следующим образом:

$$E = H + \frac{\rho}{q} \frac{v^2}{2} \quad (3.2)$$

Где, энтальпия определяется как:

$$H = \sum_j Y_j h_j \quad (3.3)$$

Окончательно уравнение для не адиабатического диффузионного горения

выглядит следующим образом:

$$\frac{[H^+]}{C_p} + A \cdot (p\bar{H}) = A \cdot \left( \frac{k_t}{[H^+]} \right) + \frac{S}{C_p} \quad (3.4)$$

Где,  $k_t$  – коэффициент теплопроводности.

Для решения задач диффузионного горения необходимо решить уравнение транспорта для одного или двух консервативных скалярных единиц (доли смеси). Уравнения не решаются для каждой отдельной частицы смеси.

Для решения турбулентных процессов применяются различные модели турбулентности. В нашем случае мы воспользовались моделью  $k$ - $\epsilon$  realizable (реализуемое). Уравнение транспорта определяется следующими уравнением. Первое уравнение (3.5) определяет турбулентную кинетическую энергию  $k$ . Второе (3.6)  $\epsilon$  скорость диссипации кинетической энергии.

### 3.2 Изучение процесса перемешивания топлива

Процессы смешения топлива изучались с помощью численного моделирования [147]. Модель основана на схеме газовой горелки, представленной в работах

Механизм переноса теплоты в турбулентном пограничном слое значительно сложнее, чем в ламинарном, и пока еще не совсем ясен. В ламинарном пограничном слое теплота переносится путем теплопроводности и конвекции. В пристенной части пограничного слоя, где скорость жидкости очень мала, теплота переносится в основном теплопроводностью. С увеличением расстояния от стенки (в пределах пограничного слоя) продольная скорость потока увеличивается. Вместе с ней увеличивается интенсивность переноса теплоты конвекцией. В турбулентном пограничном слое, в его турбулентной части в результате пульсаций скорости происходит непрерывное перемешивание макрочастиц жидкости. Если в пограничном слое имеется поперечный градиент температуры, то процесс перемешивания приводит к дополнительному переносу теплоты. Перенос теплоты через турбулентный пограничный слой более интенсивен, чем через ламинарный

Теплоотдача при турбулентном режиме. При турбулентном режиме движения перенос тепла внутри жидкости осуществляется в основном путем перемешивания. При этом процесс перемешивания протекает настолько интенсивно, что по сечению ядра потока температура жидкости практически постоянна. Резкое изменение температуры наблюдается лишь внутри тонкого слоя у поверхности.

Трубы Горенья были укорочены из-за отсутствия моделирования процесса горения. Топливоподающая труба типа 3 отличается от всех остальных тем, что обеспечивает тангенциальную подачу топлива. Трубы типа 4 и 5 отличаются тем, что они имеют форсунку, установленную в трубе подачи топлива, показанной на рисунке 25. Обычные формы используемых блефовых тел-цилиндрические стержни, прямоугольные

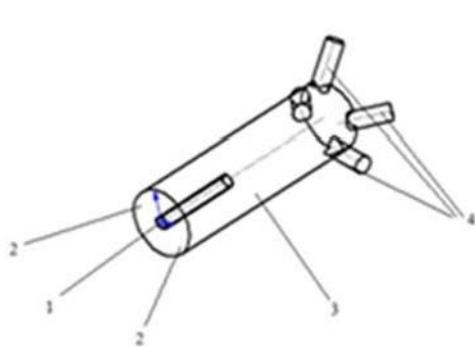
диски, перегородки, конусы или желоба типа "vce", как показано на фиг. (которые производят

в их следе образуется низкоскоростной рециркулированный поток, в котором горение может быть

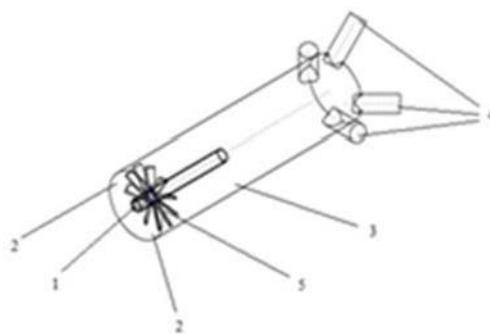
инициируется и поддерживается. Распространение пламени в другие регионы происходит следующим образом

это стало возможным благодаря переносу тепла и радикалов из окружающей среды.

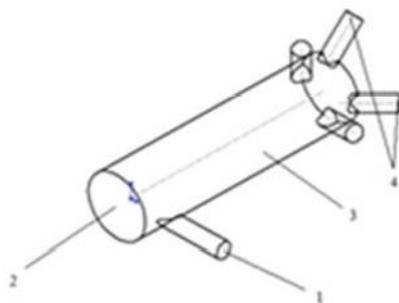
Границы зоны рециркуляции с прилегающей свежей смесью.



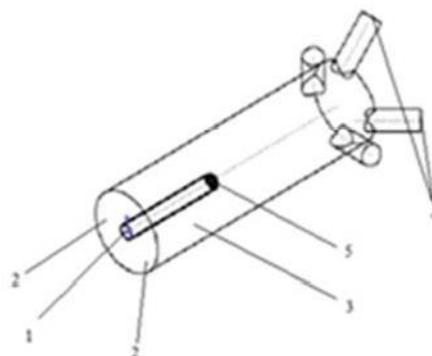
Тип 1



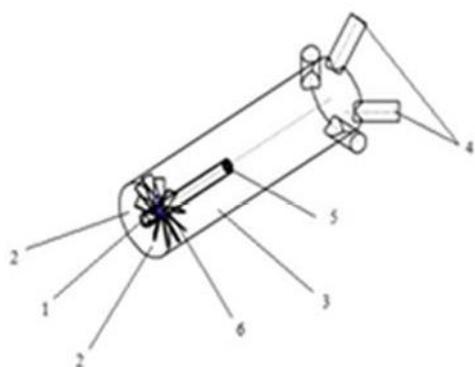
Тип 2



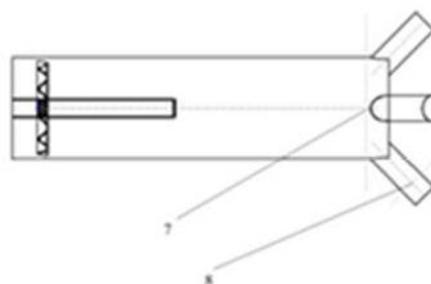
Тип 3



Тип 4



Тип 5



Места срезов

1 – трубка для подачи топлива; 2-вход воздуха; 3 – корпус трубы для подачи топлива; 4 – раздаточные патрубки; 5 – насадка на трубку для подачи топлива; 6 – закручивающиеся лопатки; 7 – срез в трубе для подачи топлива; 8 – срез на патрубках для раздачи топлива

Рисунок 24 - Варианты конструкции труб

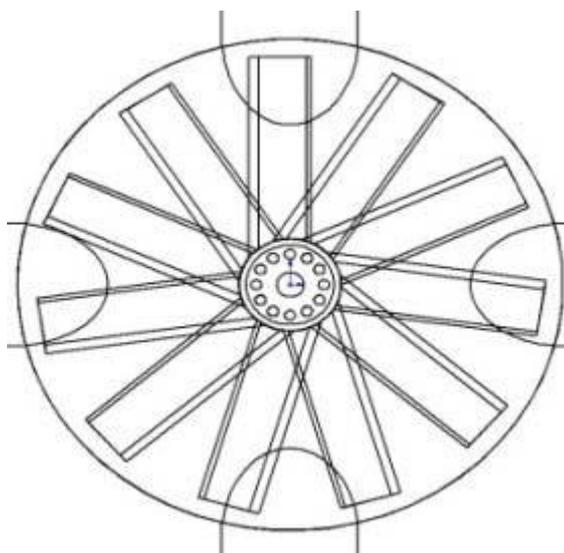


Рисунок 25 - Общий вид насадки для подачи топлива

Для расчета труб для перемешивания топлива использовались начальные условия, представленные в таблице 2.

Таблица 2 - Начальные условия

Параметр	Единица измерения	Величина
Количество ячеек тела	-	500000
Начальная температура топлива	К	300
Начальная температура воздуха	К	450
Скорость подаваемого воздуха	м/с	15
Расход топлива	кг/с	0,005

Граничные условия на входе воздуха задавались температурой и скоростью течения. Граничные условия на входе топлива задавались массовым расходом и температурой. Выходной участок задавался давлением (pressure outlet).

На рисунке 26 представлены контуры температур различных вариантов труб для подачи газа. Из рисунков видно, что при тангенциальной подаче газа на оси трубы существует область высокой температуры (450 К), которая протягивается до конца трубы. Видно, что с закруткой (тип 3) линия низких температур имеет более широкие формы. А при установке отверстия для подачи топлива, перемешивание происходит еще раньше, практически у устья трубки для подачи топлива.

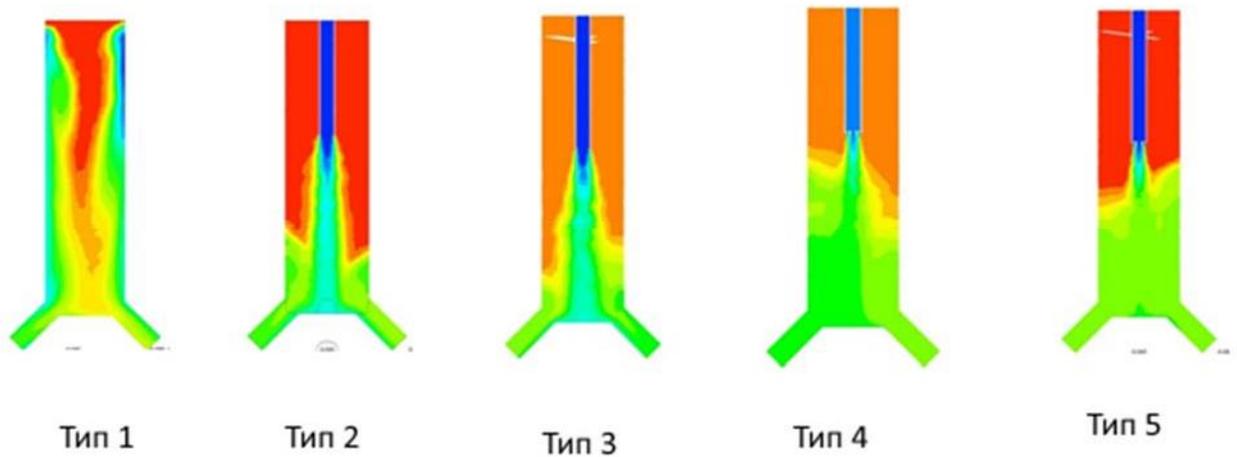


Рисунок 26 - Контуры температур в зависимости от угла расположения лопаток

На рис. 27 показаны контуры осевых скоростей различных типов труб. Желтый - это положительные скорости, а синий - отрицательные. При подаче топлива и отсутствии закрутки в начале, что перед распределительными трубами имеется огонь, который создает дополнительное сопротивление и снижает расход топлива. Когда факель закручен (Тип 3), в основании трубы подачи газа возникает обратный поток. При подаче через отверстия (тип 4,5) обратных потоков не наблюдается.

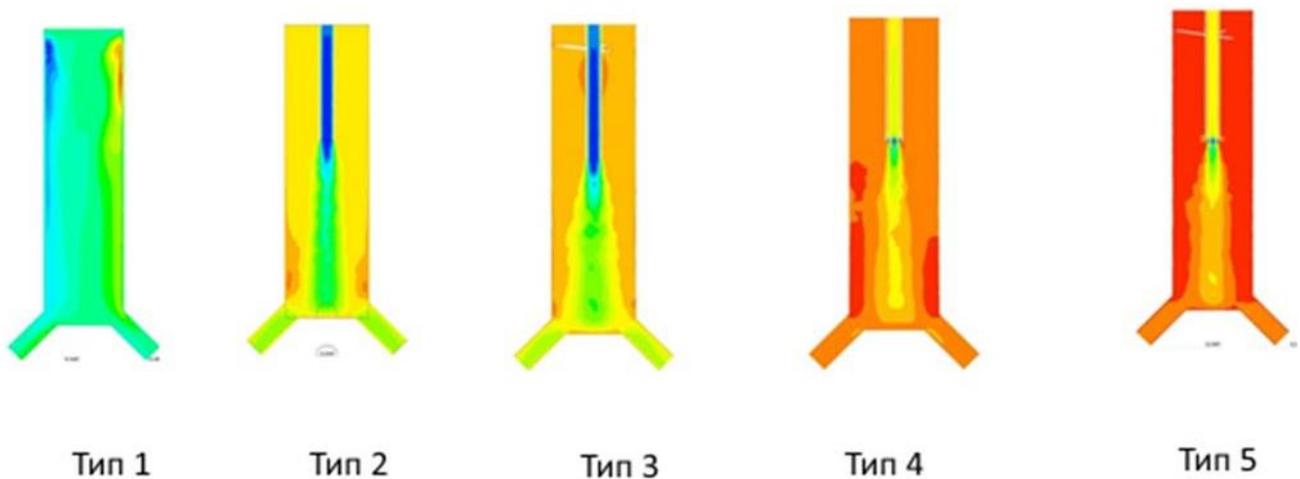


Рисунок 27 - Контуры скоростей в зависимости от угла расположения лопаток

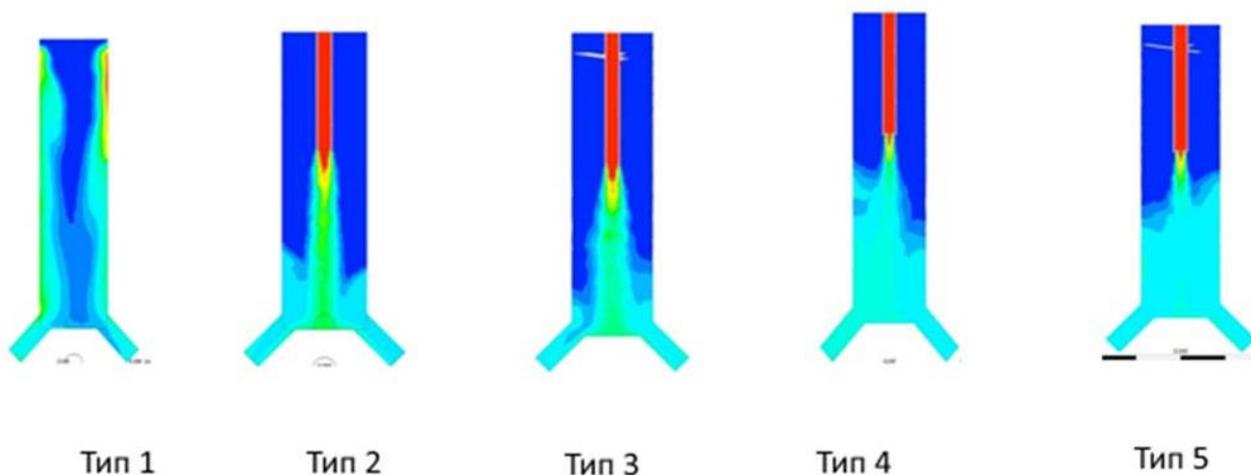


Рисунок 28 - Контуры скоростей в зависимости от угла расположения лопаток

На рис. 28 показано, как изменяется расход топлива в зависимости от конструкции труб. При тангенциальной подаче топливо движется вдоль стенок под действием силы закрутки, заданной тангенциальной подачей. Если сравнить варианты 2,3, то можно увидеть, что топливо имеет более широкий контур при вращении. При установке отверстия на трубе подачи топлива топливо смешивается раньше.

На рисунках 29,30 приведены концентрации топлива вдоль оси трубки и патрубка для раздачи топлива. Видно, что при тангенциальном подводе, топливо снижается на оси и увеличивается на краях. При 2,3 типах труб, топливо имеет высокую концентрацию вдоль оси, хотя при закрутке зависимость более пологая (тип 3). Самые ровные зависимости концентраций видны при распыливании через специальное отверстие.

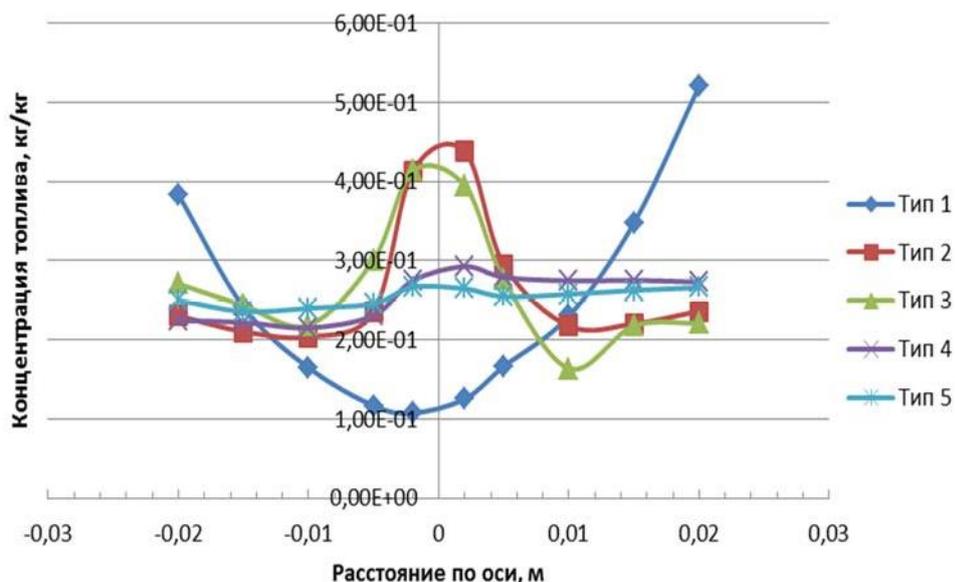


Рисунок 29 - Концентрации топлива на срезе трубки для раздачи топлива

О точно таких же результатах можно сказать увидеть. Здесь на графике показано что малых оборотах, при низких скоростях потока оно отражается на закрутку(тип 3), а максимальная при тангенциальном подводе. Хотя при специальном отверстии (тип 4,5) топливо равномерно, но концентрация больше, чем при обычной закрутке (тип 3). Также видно, что с закруткой и отверстием (тип 5) концентрация топлива ниже, чем без закрутки.

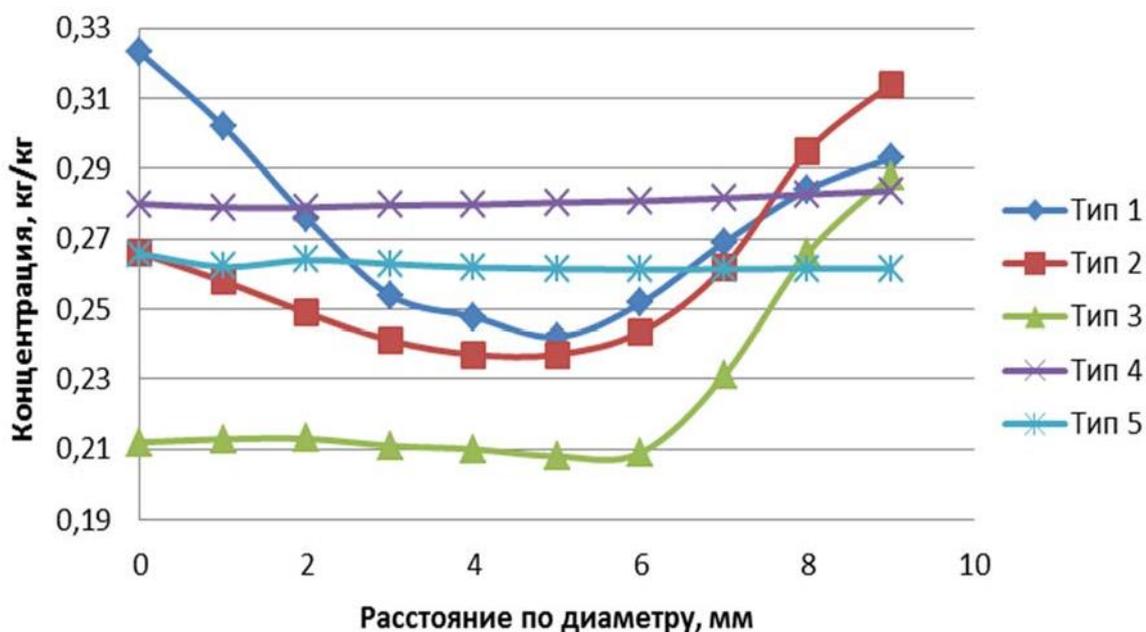


Рисунок 30 - Концентрации топлива на срезе раздающего патрубка

Из результатов проведенного моделирования можно сделать следующий вывод:

- 1 на перемешивание топлива с воздухом сильно влияет наличие закрутки на входе в трубу;
- 2 режим истечения топлива в пространство трубы, также заметно влияет на перемешивание;
- 3 однозначно можно сказать что наиболее оптимальным вариантом является труба с закруткой воздуха на входе в трубу.

### 3.3 Изучение процесса горения в микрофакельной горелке

На рисунке 31 представлена конструкция газовой микрофакельной горелки [149, с.2]. Принцип работы горелки следующий: воздух из компрессора поступает в полость горелки проходя через лопатки для закручивания потока 1, тем самым получая закрутку. Газ поступает в трубу для подачи газа 2, после чего разделяется по раздающим патрубкам 3, на которых установлены сопла для раздачи.

Как и любое другое инженерное решение, газовая горелка требует доводки, определения слабых зон. Одной из важных задач является определение влияния закрутки на процесс горения и образования токсичных веществ, в частности оксидов азота.

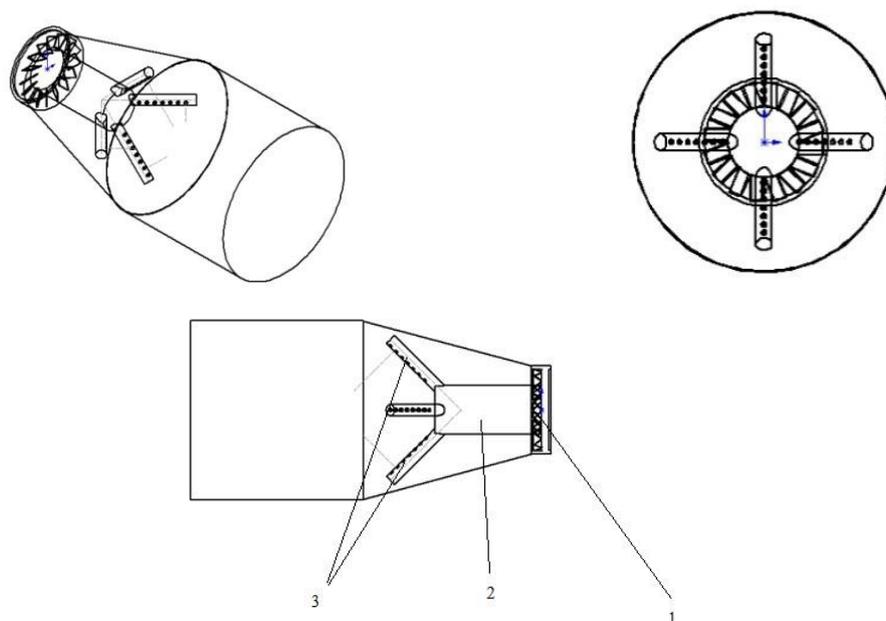


Рисунок 31 - Общий вид микрофакельной горелки. Здесь: 1 – лопатки для закручивания потока, 2 - труба для подачи топлива, 3 – раздающие патрубки с соплами

Каждое раздающее сопло содержит 7 сопел диаметром 2 мм, расположенных в длину раздающего патрубка. Для упрощения расчета, количество раздающих патрубков было сокращено до 4.

Для расчета горелки использовались начальные условия, представленные в таблице 3. Расход топлива задавался как общий для всех сопел.

Таблица 3- Начальные условия

Параметры	Единица измерения	Величина
Количество ячеек тела	-	500000
Начальная температура топлива	К	300
Начальная температура воздуха	К	450
Скорость подаваемого воздуха	м/с	15
Расход топлива	кг/с	0,02

Граничные условия на входе воздуха задавались температурой и скоростью потока. Граничные условия на входе топлива задавались массовым расходом и температурой. Выход из моделируемой зоны был задан напорным выпуском.

В результате расчетов были получены температурные контуры при различных углах установки лопастей для закручивания потока, показанные на рисунке 32.

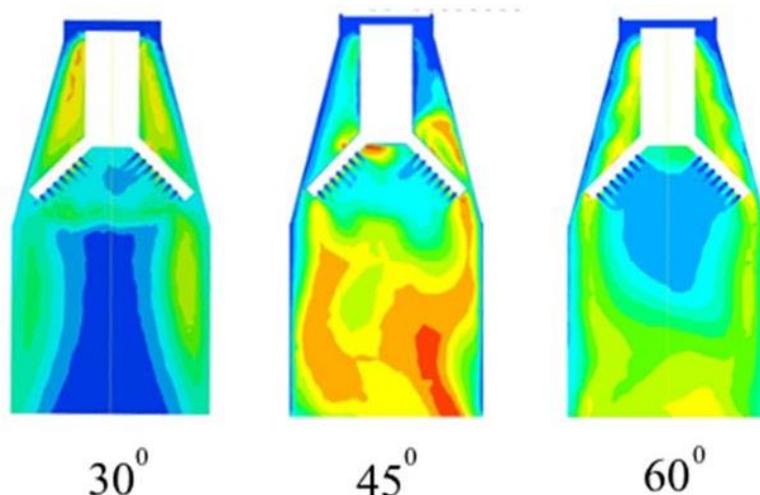


Рисунок 32 - Контур температуры в зависимости от угла расположения лопаток

При самом остром угле установки скручивающих лопастей на входе в газовую горелку (30°) видно, что высокая температура находится в зоне топливоподающей трубки. Температура в этой зоне достигает 1700 К. заметно, что центральная часть горелки очень холодная, температура в ней не превышает 500 К, что свидетельствует о том, что горение происходит в пограничных областях к стенке. Горение составляет 45°, горение происходит неравномерно, но высокотемпературная область переместилась в переднюю часть горелки. Температура в конце горелки достигает 1900 К. замечено, что часть топлива также поступает в топливораспределительную трубу. При температуре 60° топливо горит равномерно. Высокотемпературная зона расположена в передней части горелки. Максимальная температура достигает 2000 К.

Закономерности процесса горения легко понять, если увидеть контуры скоростей, которые определяют движение частиц топлива и воздуха. На рисунке 33 представлены контуры осевых скоростей при различных углах установки лопаток.

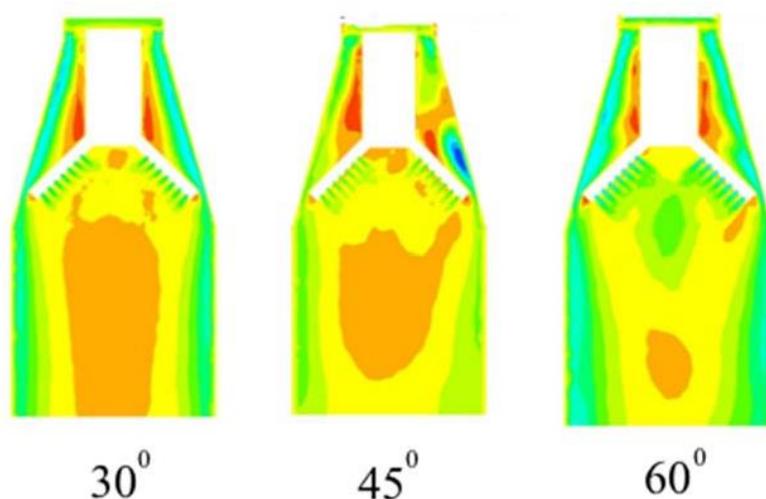


Рисунок 33 - Контуры скоростей в зависимости от угла расположения лопаток

При  $30^\circ$  происходит следующее – Из-за сильного закручивания воздуха основной поток воздуха движется в сторону передней части зоны стенки (зеленый и синий), в то время как другая часть воздуха закручивается и создает обратный ток вдоль оси горелки (желтый, темно-желтый и красный). В то же время обратный поток занимает большую часть скоростного контура. Обратные потоки также создаются в основании распределительных труб, что объясняет поток топлива в обратном направлении. Скорости в прямом направлении достигают  $40 \text{ м / с}$  из-за большого количества поступающего воздуха, а скорости обратных течений на оси достигают  $14 \text{ м / с}$  (темно-желтый цвет).

Почти такую же ситуацию можно наблюдать и под углом  $45^\circ$ . В этом случае он имеет отчетливые размеры, но занимает большую площадь по всему поперечному сечению. Ток почти такой же, как и при  $30^\circ$ , за исключением того, что нет тока в одной из зон топливоподающей трубы. Также отмечается, что положительная скорость у стенок меньше, чем при  $30^\circ$ . Максимальное значение скорости (положительное) достигает  $60 \text{ м / с}$  в области распределительной трубы (темно-синяя).

При  $60^\circ$  поток больше измеряется, и  $Zot$  заметно меньше, чем в других режимах потока. Существует также положительный поток вблизи устьев топливораспределительных форсунок, что уменьшает обратный поток топлива в топливораспределительную трубу. Это также можно увидеть на графиках температур. Отмечается, что  $Zot$  находится дальше, чем в других режимах течения (темно-желтый), максимальная положительная скорость достигает значения  $30 \text{ м/с}$ , а обратные токи- $10 \text{ м/с}$ .

Несмотря на то, что обратные токи обсуждались при рассмотрении контуров, необходимо детально рассмотреть размеры и их расположение. Инжир. На рис. 34 показан график зависимости скоростей вращения на оси горелки от угла поворота лопастей. На графике видно, что при  $60^\circ$  ток на оси положителен, но около конца горелки имеется  $Zot$ . При температуре  $30^\circ$  рабочий ток в основном отрицательный из-за большой зоны рециркуляции. При  $45^\circ$  в конце горелки

возникает положительный ток.

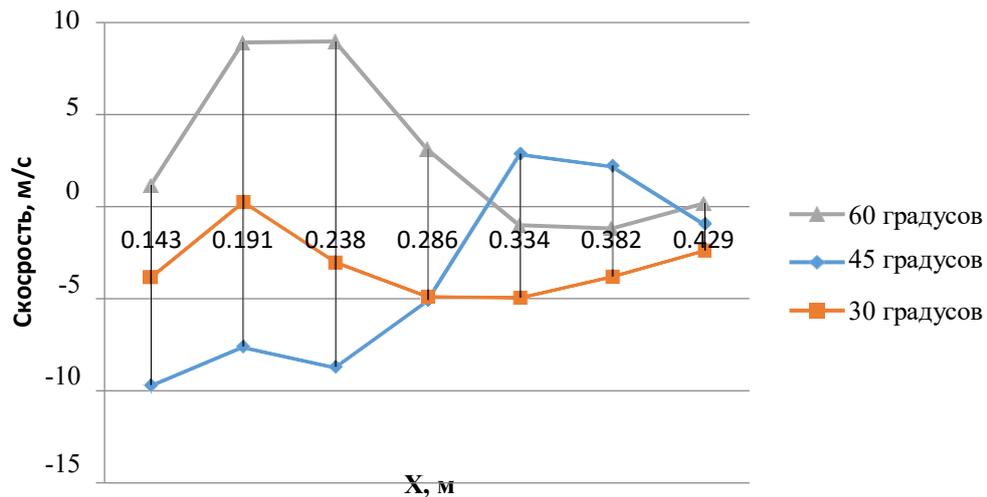
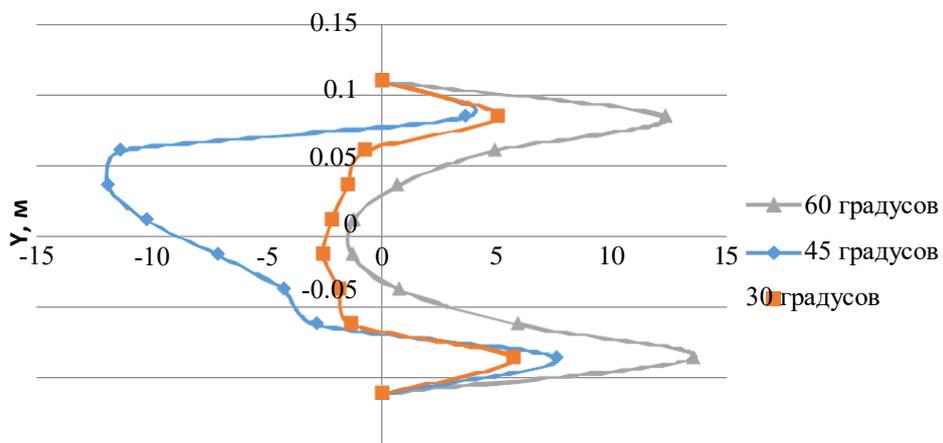


Рисунок 34 - График зависимости скоростей на оси горелки от угла закручивающих лопаток

Одной из важнейших особенностей закрученного потока является наличие рециркуляционных зон и их размеры. На рис. 35 показан график размеров зон рециркуляции в зависимости от угла закручивания лопастей. На рис. 35 показано, что максимальный размер зоны рециркуляции достигается под углом 45°, а минимальный-под углом 60°.



-0.1

-0.15

Скорость, м/с

Рисунок 35-размеры рециркуляционных зон при различных углах скручивания лопастей

Основываясь на результатах численного моделирования процесса Горенья, можно сделать следующие выводы:

- из-за наличия больших обратных токов под углами  $45^\circ$ ,  $30^\circ$ , Горенье возникает в области трубы подачи топлива;
- температурный контур в  $30^\circ$ , хотя и имеет симметричную форму, не позволяет оптимально сжигать топливо, так как в центре образуется холодная зона, а высокая температура расположена вблизи стенок. Это обстоятельство отрицательно сказывается на надежности работы как горелки, так и лопаток турбины (из-за неправильного температурного профиля на выходе из КС);
- при  $45^\circ$  температура не симметрична;
- наиболее оптимальный угол установки скручивающих лопастей составляет  $60^\circ$ .

### 3.4 Изучение процессов горения за уголковыми стабилизаторами

#### 3.4.1 Влияние скоростей на процесс горения

На рисунке 36 представлена 3-Д модель, использованная при моделировании процесса горения за уголковыми стабилизаторами [153]. Зона горения и уголки моделировались по образцу экспериментальной модели [154]. Модель состоит из 4 основных частей: сопла для подачи топлива, входа для подачи воздуха, уголкового стабилизатора и выхода продуктов сгорания. Длина стенок уголков равна 30 мм, а угол на вершине уголка  $45^\circ$ . Граничные условия моделирования представлены в таблице 4. Общий вид уголковых стабилизаторов представлен на рисунке 48.

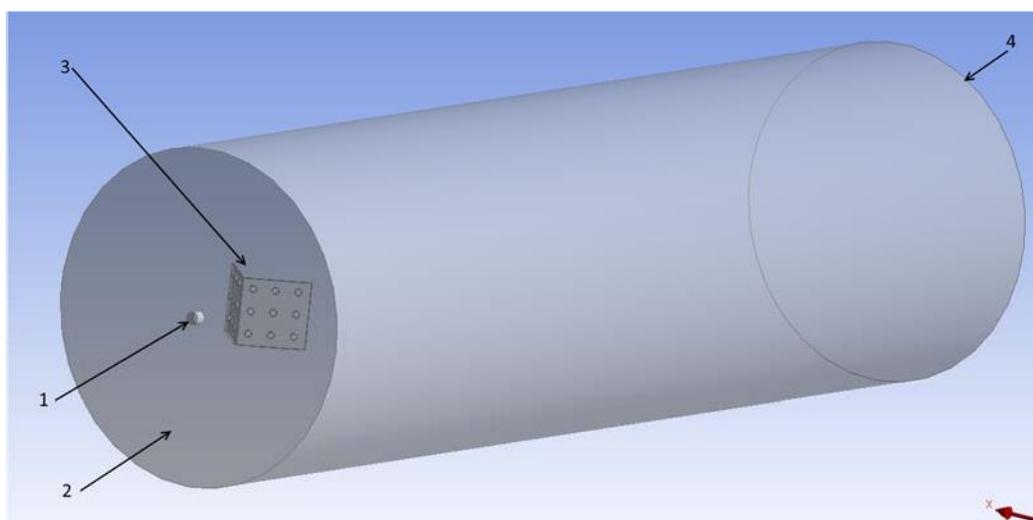


Рисунок 36-схема модели. 1-форсунка подачи топлива; 2-воздухозаборник; 3-перфорированный уголовой стабилизатор; 4-выходная часть.

При моделировании использовались два типа углов: 1-перфорированный; 2 – нормальный угол без перфорации.

Таблица 4 - Начальные условия

Параметры	Единица измерения	Величина
Количество ячеек тела	-	800000
Начальная температура топлива	К	300

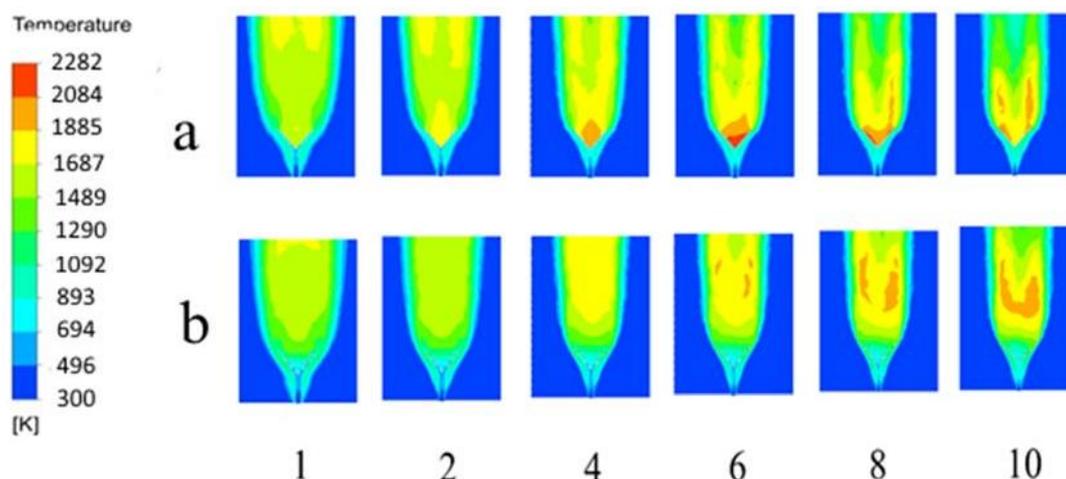
Начальная температура воздуха	К	300
Скорость подаваемого воздуха	м/с	1-10
Расход топлива	кг/с	0,00033

Скорость воздуха изменялась с шагом 2 м / с. Расход топлива был постоянным.

На рис. 37 показаны температурные контуры со скоростью 1-10 м / с для нормальных углов (а) и перфорированных углов (б). При относительно низких скоростях подачи воздуха (до 4 м/с) за углами не образуются высокотемпературные зоны. Это происходит из-за слабой закрутки потока на концах углов. Увеличение скорости приводит к повышению температуры в зоне рециркуляции, образованной за угловым стабилизатором. Это связано с тем, что сильная рециркуляционная зона втягивает в себя высокотемпературные газы. С одной стороны, это позволяет увеличить дальность работы горелки, за счет эффективного смешивания сгоревшего топлива и свежих тепловыделяющих сборок. С другой стороны, этот эффект приводит к увеличению времени нахождения газов в высокотемпературной зоне. Принцип работы кольцевых стабилизаторов заключается в следующем: часть газозвушной смеси в насадке горелки через отверстия малого диаметра попадает в кольцевой зазор между насадком и стабилизатором. Площадь поперечного сечения кольцевого зазора значительно больше суммарной площади отверстий. В результате газозвушная смесь, попадая в кольцевой зазор, имеет малую скорость и образует устойчиво горящее кольцо газа, поджигающее основной факел. Испытания инжекционных горелок с кольцевыми стабилизаторами показали, что при избыточном давлении газа до 1,5 кгс/см<sup>2</sup> отрыва пламени от устья горелки не бывает.

При использовании перфорированных угловых стабилизаторов заметно, что во внутренней части углов не образуются высокотемпературные зоны.

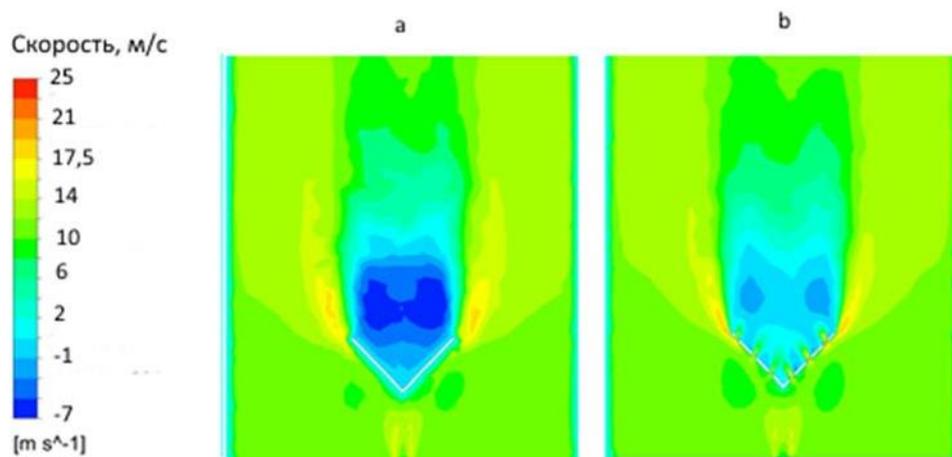
Это говорит о том, что образование термического азота имеет более низкую скорость.



а – уголок с  $L=30$  мм, б – уголок с  $L=30$  мм, перфорированный.

Рисунок 37 - Поля температур вокруг уголкового стабилизатора при изменении скоростей, м/с.

На рисунке 38 представлены поля скоростей за уголковыми стабилизаторами при скорости 10 м/с. За обычными уголками образуется сильная зона рециркуляции (ЗОТ). Отрицательные значения скоростей в ней достигают 7,5 м/с. А на кромках уголка скорость достигает 20 м/с. Это говорит о сильной вовлеченности продуктов сгорания в рециркуляционную зону, тем самым позволяя эффективно поджигать свежую смесь.



В случае перфорированных углов скорость во внутренней части угла ниже и не превышает 3 м / с. Зона рециркуляции ослабляется ФА, проходящей через перфорации. Также заметно, что скоростной поток по краям ниже по сравнению с углом без перфорации. Ослабление зоны рециркуляции сокращает время нахождения газов в высокотемпературной зоне. Частичный воздухозаборник во внутреннюю зону углов снижает среднюю температуру в зоне Горенья. Эти факторы приводят к значительному снижению образования оксидов азота.

а – уголок с  $L=30$  мм, б – уголок с  $L=30$  мм, перфорированный

Рисунок 38 - Поля продольных скоростей вокруг уголковых (перфорированных и обычных) стабилизаторов при скорости подачи воздуха 10 м/с.

На рис. 39 показана зависимость выбросов оксидов азота от скорости движения воздуха. Дополнительно представлены экспериментальные данные, полученные в работе [155,156]. Из графика видно, что увеличение скорости воздуха, т. е. увеличение  $\alpha$ , приводит к уменьшению образования оксидов азота. Также видно, что результаты численного моделирования сходятся с полученными экспериментальными данными.

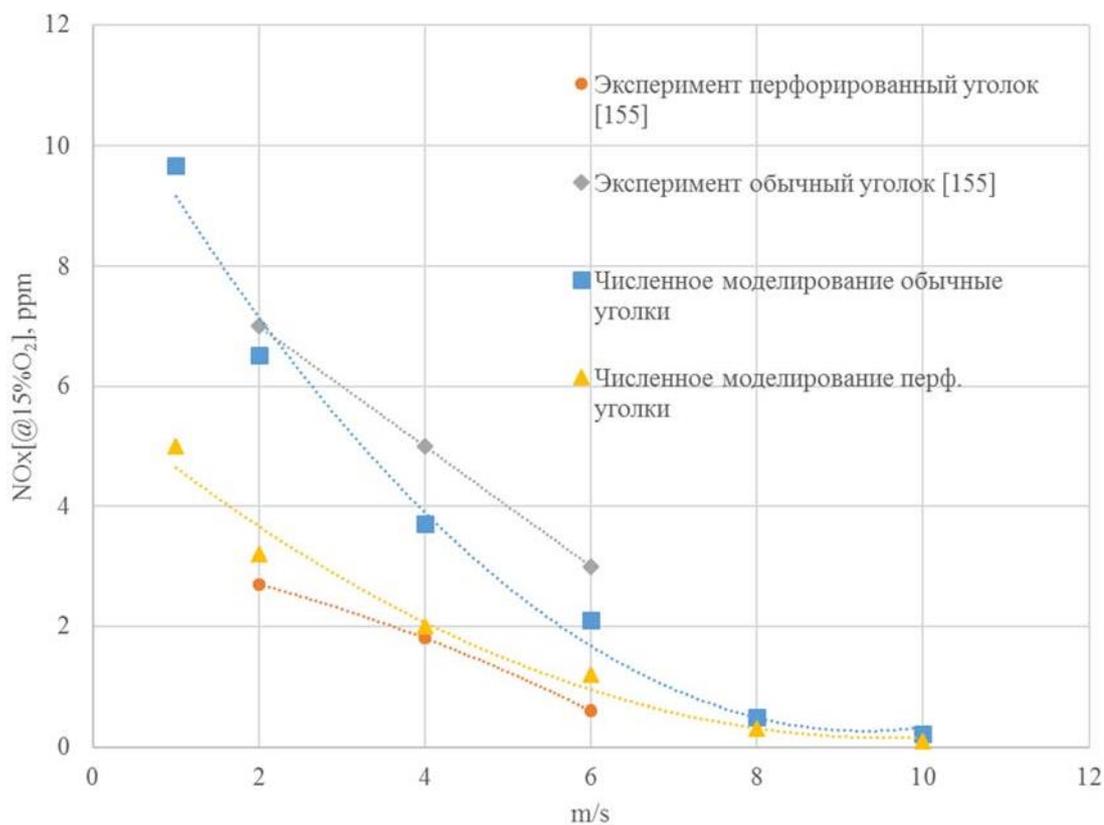


Рисунок 39 - Зависимость концентрации NOx от скорости воздуха

На рис. 40 показана зависимость температуры на выходе из зоны моделирования от скорости подаваемого воздуха. В этом случае увеличение скорости воздуха приводит к снижению средней температуры, что в свою очередь приводит к уменьшению выбросов оксидов азота.

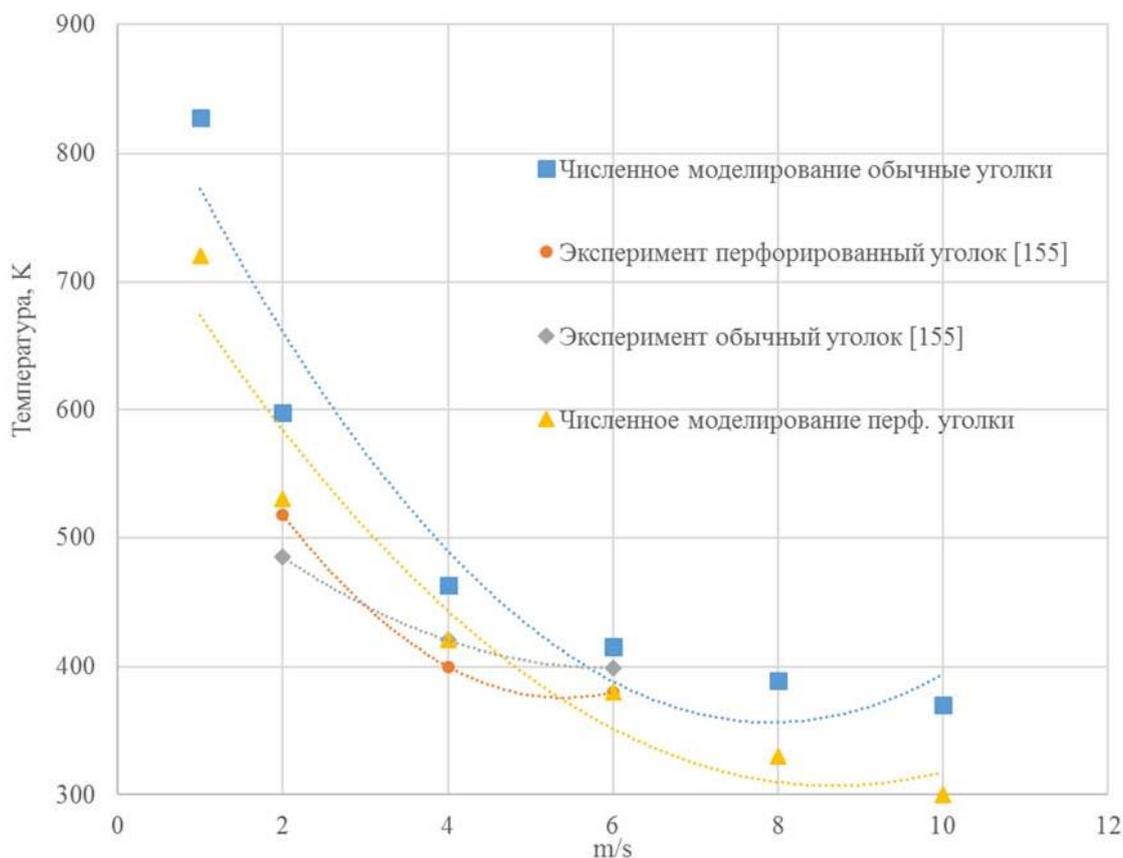
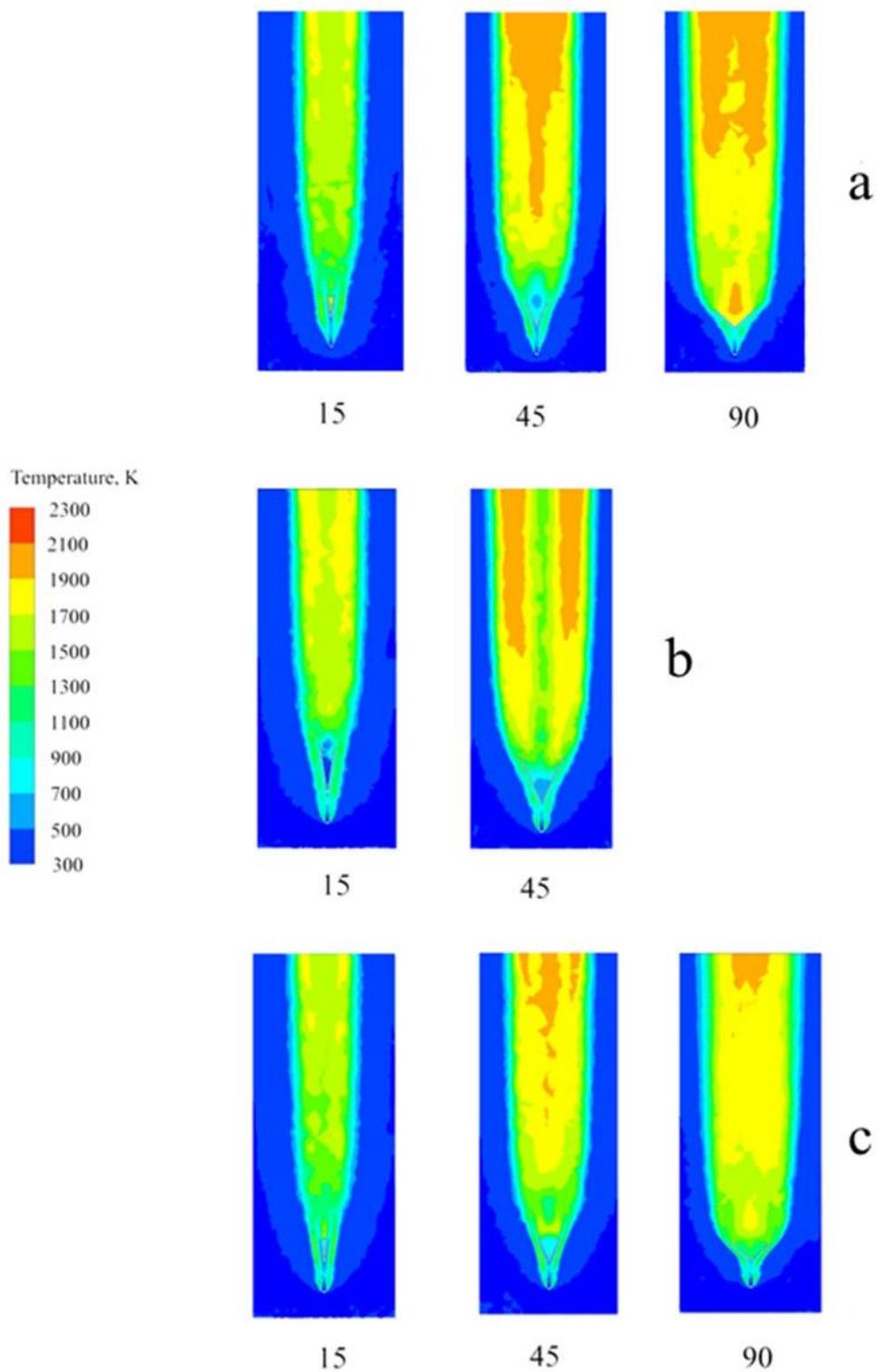


Рисунок 40 - Зависимость температуры уходящих газов от скорости воздуха  
3.4.2 влияние угла раскрытия и ширины угла

Анализ результатов численного моделирования, приведенных на рис. 41 для температуры при различных углах раскрытия, показывает, что при  $\beta=15^\circ$  интенсивного горения нет и температуры незначительны, как показали результаты эксперимента. При  $90^\circ$  наблюдается интенсивное горение и развитый Зот, но на углах с перфорацией температура в центральной зоне значительно ниже, чем на нормальных углах, что объясняет повышение температуры на выходе из-за удлинения выгорания. При  $45^\circ$  на температурном уровне можно заметить низкотемпературный шлейф вдоль оси, что свидетельствует о неполном сгорании и резком увеличении оксидов азота, обусловленном большой температурной неравномерностью поперек сечений.

При обычном угле стабилизатора в  $45^\circ$  происходит интенсивное горение, которое повышает температуру, что в свою очередь влияет на увеличение концентрации оксидов азота. компания Gorenje



А - L=30 мм; б - L=50 мм; с- L=30 мм, перфорированный  
 Рисунок 41 - Контуры температур при различных углах раскрытия  $\beta^\circ$ , при скорости воздуха 6 м/с

### 3.4.2 изучение влияния ширины угла на поток

Как видно из рисунков 42,43, увеличение ширины стабилизатора приводит к увеличению зоны рециркуляции. Более того, при минимальной ширине поток практически не нарушается. Увеличение ширины приводит к появлению отрицательных скоростей за стабилизаторами и увеличению скоростей по краям углов. При моделировании скорость воздуха была равна 10 м/с, а расход топлива-0,00033 кг / с.

Существует также существенная разница между площадью рециркуляции правильного угла (а) и перфорированного угла (б). При использовании перфорированного угла во внутренней области появляются зоны положительных и отрицательных скоростей, что позволяет более эффективно смешивать топливо с воздухом.

Также видно, что при ширине 35 мм, которая равна  $90^\circ$ , контуры скоростей вокруг углов имеют более низкие значения, что связано с тем, что часть воздуха поступает в зону рециркуляции через перфорации. Снижение скорости за поворотом приводит к увеличению пределов стабильной работы.

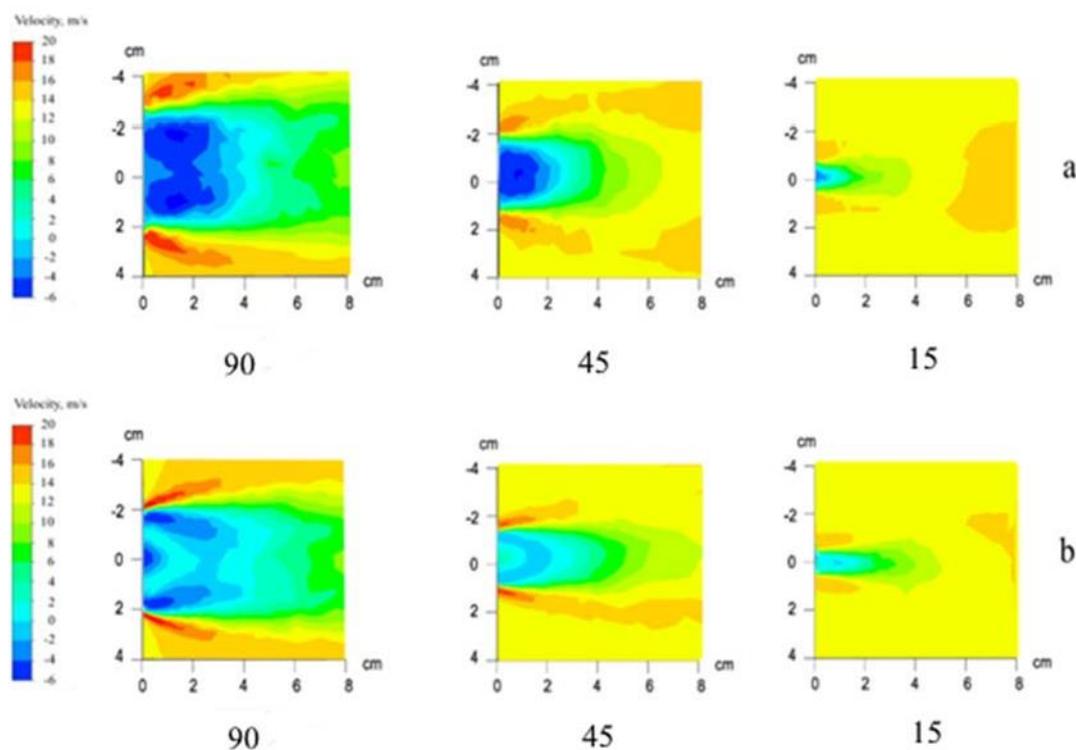


Рисунок 42 - Контур скорости при различных углах раскрытия  $\beta^\circ$ : а- уголок с  $L=30$  мм, б- уголок с  $L=30$  мм, с перфорацией

На рис. 43 показаны контуры скорости для трех типов угловых стабилизаторов. По нему можно судить о развитии зоны вторичной переработки за углом. Наименее развитый Зот встречается при  $15^\circ$ . Повышенная Зот происходит при  $90^\circ$ , а оптимально эффективные зоны - при  $45^\circ$ . При рассмотрении стабилизатора угла наклона на  $90^\circ$  с перфорацией происходит выброс газов из Зот против течения. Наиболее рациональная картина возникает при  $45^\circ$  с перфорацией. Из предыдущих графиков заметно,

что угол с перфорация обеспечивает низкие выбросы оксида азота при 45° и самую высокую эффективность сгорания.

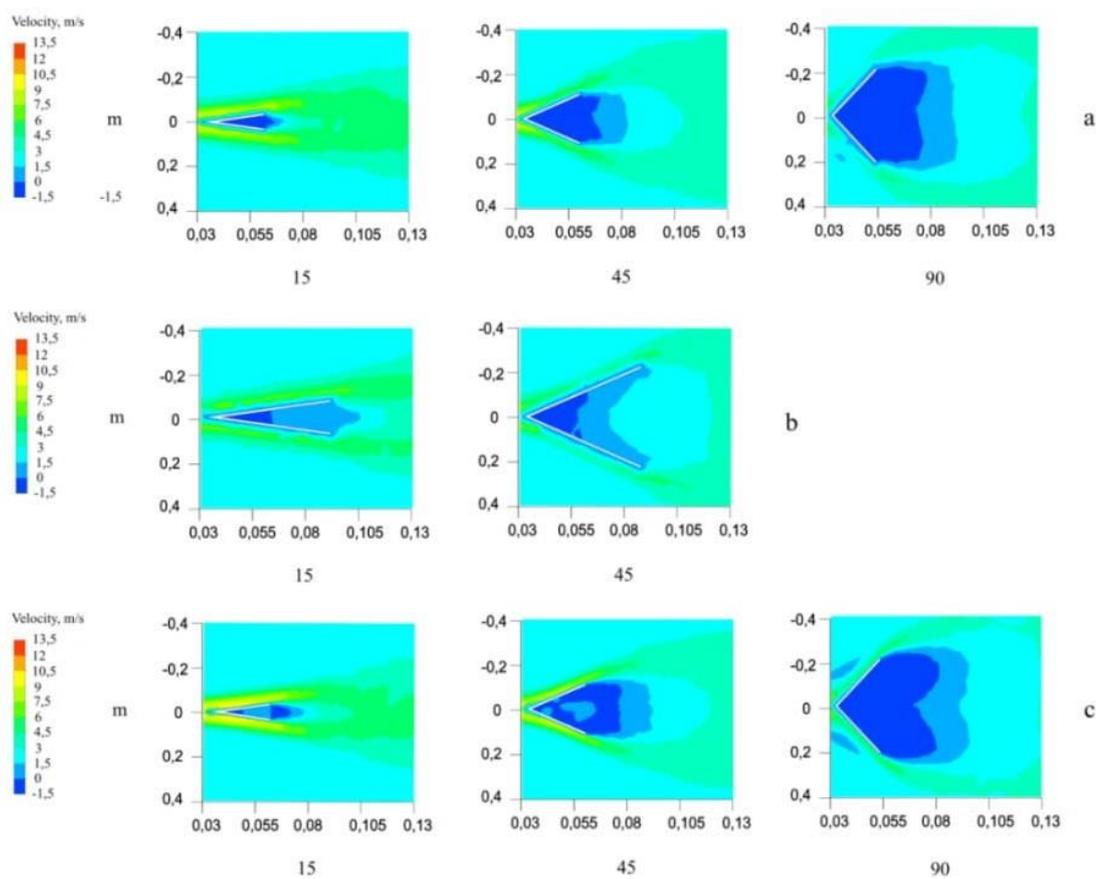


Рисунок 43-контуры осевых скоростей при различных углах раскрытия  $\beta^\circ$ . а- угол с  $L=30$  мм; б-угол с  $L=50$  мм; в-угол с  $L=30$  мм, перфорированный

#### Исследование 3.4.2 полу перфорированные углы

Схема моделируемой области показана на рис. 44. общий вид углов и схемы подачи топлива показан на рисунке 45. Поскольку программа написана на английском языке, область моделирования представлена на английском языке. Условия эксперимента приведены в таблице 4.

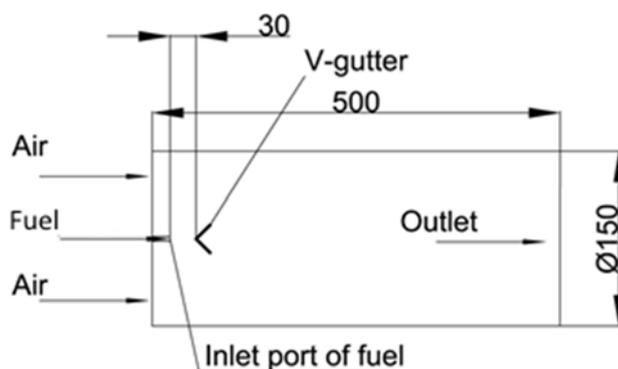


Рисунок 44-продольный разрез моделируемой площади

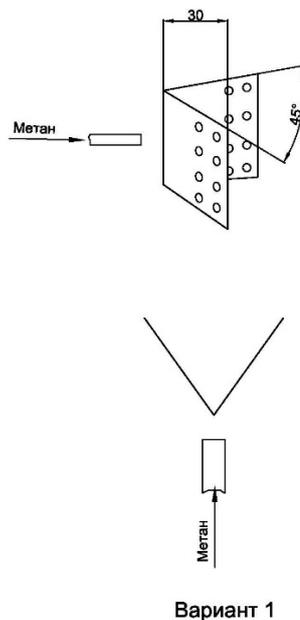


Рисунок 45 - Общий вид уголков и схема подачи

На рис. 46 показаны температурные контуры процесса горения за угловыми стабилизаторами в зависимости от коэффициента избытка воздуха  $\varphi$ . Горение максимальное значение избытка воздуха  $\varphi=0,5$  (2 м / с), так называемая "богатая" концентрация топлива, указывает на высокую температуру в угловом следе. Это связано с большим количеством топлива, проходящего через перфорацию в зоне рециркуляции, расположенной за углом.

Увеличение расхода воздуха снижает концентрацию топлива в угловом следе. При  $\varphi=0,4$  (4 м / с) и  $\varphi=0,3$  (6 м/с) температура за углом ниже, чем при  $\varphi=0,5$ . Однако вы можете видеть, что зона высоких температур движется в сторону угла, что указывает на увеличение полноты сгорания. Увеличение расхода воздуха приводит к сужению пламени и появлению высокотемпературной зоны в центре факела. Это особенно заметно при  $\varphi=0,1$  (10 м / с).

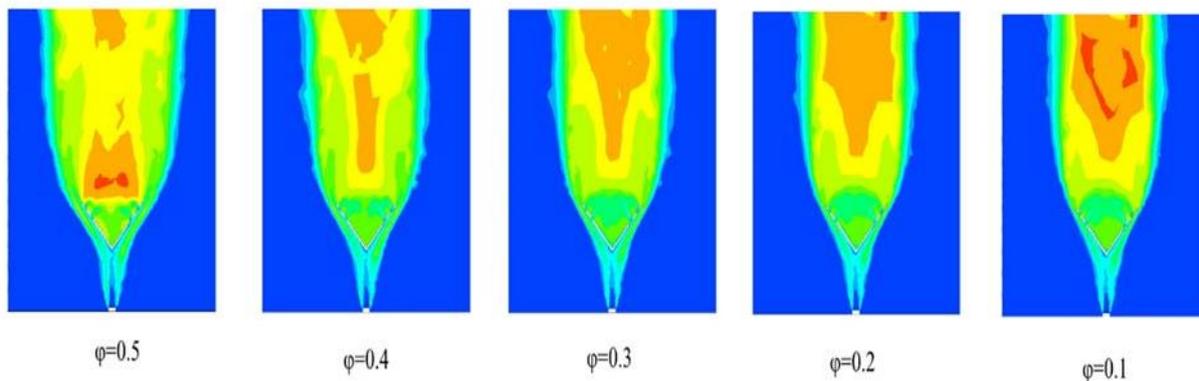


Рисунок 46 - Температурные контуры при различных значениях коэффициента избытка воздуха  $\varphi$

### 3.5 Выводы по разделу

Проведенное численное моделирование позволило сделать следующие выводы:

1. На процесс стабилизации пламени и выброс вредных веществ существенное влияние оказывает способ подачи топлива и воздуха. численное моделирование процессов горения и перемешивания в газовой горелке позволило определить оптимальное сочетание расхода топлива и угла наклона входного регистра.

2. На процесс стабилизации пламени и образования вредных веществ в значительной степени влияет угол в верхней части углового стабилизатора, а также наличие перфорации и коэффициент избытка воздуха. Процесс горения за угловыми стабилизаторами во многом определяется структурой рециркуляционной зоны.

3. Показано, что наличие перфораций ослабляет зону рециркуляции, но также создает оптимальную концентрацию воздуха, позволяющую обеспечить низкие выбросы оксидов азота. Перфорированный угол имеет ряд преимуществ в виде относительно низких температур во внутренней части и скоростей по краям. Сравнение полученных экспериментальных данных с результатами численного моделирования показывает, что полученные результаты достаточно точны и что данный метод может быть применен.

Численное моделирование процессов горения, позволяют более детально объяснить процессы горения, при проведении экспериментов, в виду того, что реальные процессы горения достаточно скоротечны

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. По схеме конструкции были изучены несколько способом и методов сжигания топлива. Так же говорится об основных типах камеры сгорания и горелочного устройства. Исходя из расчетов и показатели были показана перспективность применения микрофакельных устройств для КС ГТУ на газообразном топливе.

2. Сделана расчет численного моделирование по способам сжигания топлива в камере сгорания, смешения ТВС, а также образования оксидов азота. Показано влияние конструктивных форм, типа, конструкций и расположения устройств по температуре, эмиссию оксидов азота и процесса смешения топлива с воздухом. По данным результатам можно более детально объяснить процесс горения газообразного топлива.

3. Микрофакельные устройства и сжигание топлива используются на многих ГТУ в Казахстане. Как вы все знаем по теорий горения газообразной смеси они при нормальных условиях избытка воздуха, при расходе топлива и воздуха горение происходит полностью, что приводит к большой концентрации оксида азота и других токсичных веществ. Задача использования микрофакельного сжигания в том чтобы предотвратить появление вредных веществ в дымовых газах.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Сигал И.Я. Защита воздушного бассейна при сжигании топлива. - Л.: Изд-во Недра, 1988. - 312 с.
- 2 Охрана окружающей среды и устойчивое развитие Казахстана 2010-2014: Статистический сборник. Астана, 2015. - 106 с.
- 3 Лефевр А. Процессы в камерах сгорания ГТД. - М.: Изд-во Мир, 1986. – 566 с.
- 4 Зельдович Я.Б., Садовников П.Я., Франк-Каменецкий Д.А. Окисление азота при горении. - М. Изд-во Наука, 1947. - 146с.
- 5 Гупта А., Лилли Д., Сайред Н. Закрученные потоки. — М. Изд-во Мир, 1987. - 588 с.
- 6 Достияров А.М. Разработка топливосжигающих устройств с микрофакельным горением и методики их расчета: дис. док. техн. наук: 05.14.04 г.Алматы: КазНИИ Энергетики им. Чокина, 2000. - 237с.
- 7 Westbrook C.K., Dryer F.L. Chemical kinetic modelling of hydrocarbon combustion//Prog. Energy Combust. Sci. – 1984. Vol. 10. – P.1–57.
- 8 Хитрин Л.Н. Физика горения и взрыва. –М.: МГУ, 1957. - 442с.
- 9 Rubins P.M., Marchionna N.R. Evaluation of NO<sub>x</sub> prediction-correlation equations for small gas turbines// 12<sup>th</sup> Propulsion Conference, Palo Alto, CA, USA, 1976. – P. 612.
- 10 Fenimore C.P. Formation of nitric oxide in premixed hydrocarbon flames// 13-th Symposium (International) on Combustion, Pittsburgh: The Combustion Institute, 1971. - P.373-380.
- 11 Нельсон Н. Образование окиси азота при горении// Ракетная техника и космонавтика. – 1976. - №9. - С.30-36.
- 12 Ловачев Л.А. Кинетика образования NO в метано-воздушных пламенах// Химическая физика. – 1983. - №8. - С.1085-1091.
- 13 Образование и разложение загрязняющих веществ в пламени / [Н. А. Чигир, Р. Дж. Вейнберг, К. Т. Боумэн и др.]; пер. с англ. под ред. Ю. Ф. Дитякина. - М.: Изд-во Машиностроение, 1981. - 407 с.
- 14 Зельдович Я.Б., Баренблатт Г.И., Либрович А.Б., Махвиладзе Г.И. Математическая теория горения и взрыва. - М.: Изд-во Наука, 1980. - 478 с.
- 15 Сигал А.И. Образование двуокиси азота в топках водогрейных котлов малой мощности на твердом топливе// В кн.: Окислы азота в продуктах сгорания топлив. - Киев: Изд-во Наукова думка, 1981. – Т.14. - С. 130-134.
- 16 Сигал И.Я., Нижник С.С., Гуревич Н.А. Образование окислов азота в топках котлов// Теплоэнергетика. – 1971. - № 4. - С. 57-60.
- 17 Сигал И.Я. Развитие и задачи исследований по изучению условий образования окислов азота в поточных процессах // Теплоэнергетика. - 1983. - №9. - С. 5-10.
- 18 Тумановский А.Г., Гутник М.Н. Снижение концентрации оксидов азота в продуктах сгорания мощных ГТУ //Энергохозяйство за рубежом (приложение к журналу электрические станции). - 1987. - №6.

