

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра нефтехимии и техногенной безопасности

**Поиск путей повышения тепловой мощности трубчатой печи  
установки АТ**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

студентки 2 курса 252 группы

направления 18.04.01 «Химическая технология»

Института химии

Капустина Владимира Сергеевича

Научный руководитель

доцент, к.х.н.

должность, уч. ст., уч. зв.

подпись, дата

И.А. Никифоров

инициалы, фамилия

Заведующий кафедрой

д.х.н., профессор

должность, уч. ст., уч. зв.

подпись, дата

Р.И. Кузьмина

инициалы, фамилия

Саратов 2025

## **2.1 Краткая характеристика процесса горения и методы воздействия на него**

Процесс горения газообразного топлива состоит из смешения газа с воздухом, нагрева полученной смеси до температуры самовоспламенения, зажигания ее и протекания реакций горения, сопровождающихся выделением тепла. Причем смешение газа с воздухом и нагрев смеси занимают большую часть времени в процессе горения, так как реакция горения протекает практически мгновенно.

Главными участниками процесса горения являются топливо, окислитель и источник воспламенения.

В процессе горения обязательны два этапа: физический этап – создание газо-воздушной смеси горючего и окислителя, химический этап – химические реакции с образованием продуктов горения.

При этом второй этап является наиболее важным с точки зрения увеличения интенсивности передачи тепла (проводимости энергии), при повышении температуры в результате начавшегося процесса горения.

При горении возникают неравномерности концентраций топлива и окислителя, полей температур и скоростей потоков, изменяются условия создания газо-воздушной смеси, находящихся в разных температурных диапазонах образовавшегося факела. Из этого вытекает необходимость создания условий для наиболее стабильного и как следствие эффективного протекания этапов процесса горения.

Регулировка эффективности работы горелочных устройств возможна двумя методами: устойчивым и эксплуатационным.

*Устойчивый метод* обеспечивается конструктивными параметрами горелки. Он зависит от углов встречи потоков, отношения скоростей газа и воздуха, соотношения размеров этих потоков. В этом случае горелка прежде всего играет роль смесеобразователя заданной интенсивности. При выбранных конструктивных элементах горелки интенсивность смесеобразования может изменяться лишь в очень узких пределах за счет изменения соотношений между

подаваемым в горелку количеством газа и воздуха. В случае работы горелочных устройств на печах секции 3 данный метод регулирования применить невозможно по причине отсутствия возможности подачи воздуха (достигнут максимум) за счет регистров, установленных на воздухозаборнике.

*Эксплуатационный метод* обеспечивается регулированием движения и взаимодействия воздушно-газовых потоков.

## **2.2 Печи (Сфера использования трубчатых печей на перерабатывающих предприятиях, типы и конструкции печей)**

Трубчатая печь – аппарат, который предназначен для передачи нагреваемому продукту тепла, выделяющегося при сжигании топлива, непосредственно в этом же аппарате.

В настоящее время трубчатые печи получили широкое распространение в нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности, они являются составной частью многих установок и применяются в различных технологических процессах, таких как перегонка нефти, мазута, каталитический крекинг, гидроочистка, очистка масел и др.

В трубчатых печах наряду с передачей тепла нагреваемому продукту протекает процесс однократного испарения нагреваемого продукта.

Трубчатая печь имеет камеры радиации и конвекции (рисунок 1,2). В камере радиации (топочная камера), где сжигается топливо, размещены радиантные трубы. Радиантные трубы получают тепло не только излучением, но и свободной конвекцией. Из всего количества тепла, воспринятого радиантными трубами, значительная часть (до 90%) передаётся излучением, остальное тепло конвекцией. В камере конвекции наибольшее количество тепло отдаётся трубам путём конвекции (до 70%), отдача тепла излучением от газов составляет 30%.

Роль трубчатой печи в процессах переработки и получения нефтепродуктов очень разнообразна. Трубчатые печи предназначены для нагрева, испарения жидких и газообразных сред в различных процессах нефтепереработки, а также для проведения термохимических технологических процессов на предприятиях нефтехимии. Сегодня на предприятиях переработки

нефти насчитываются десятки технологических процессов, использующих как различные нефтяные и другие технологические фракции, так и различные технологии, в которых место печи, ее роль отличаются коренным образом. Этим объясняется огромное многообразие классификаций печей, нормативной документации, терминов, используемых для определения печей в проектных организациях и на производстве.

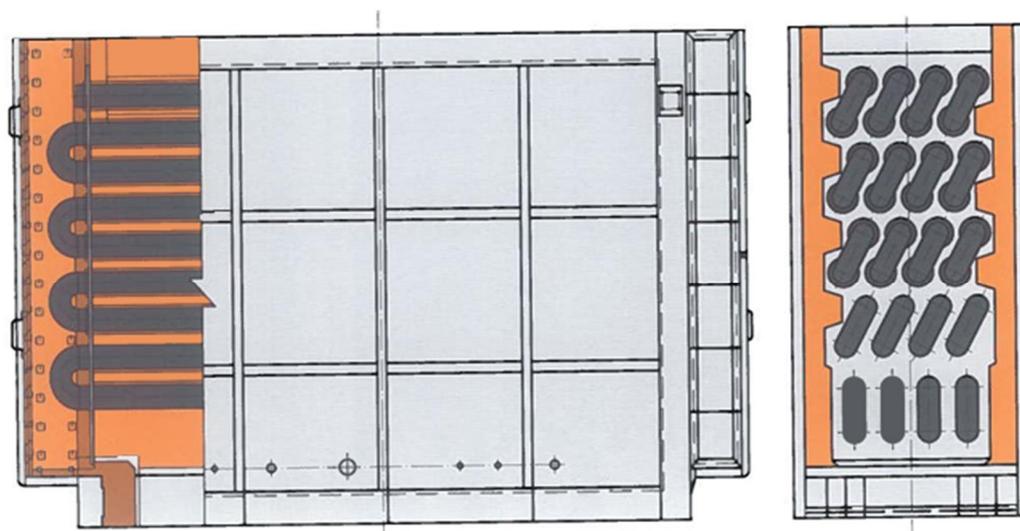


Рисунок 1- Общий вид камеры конвекции

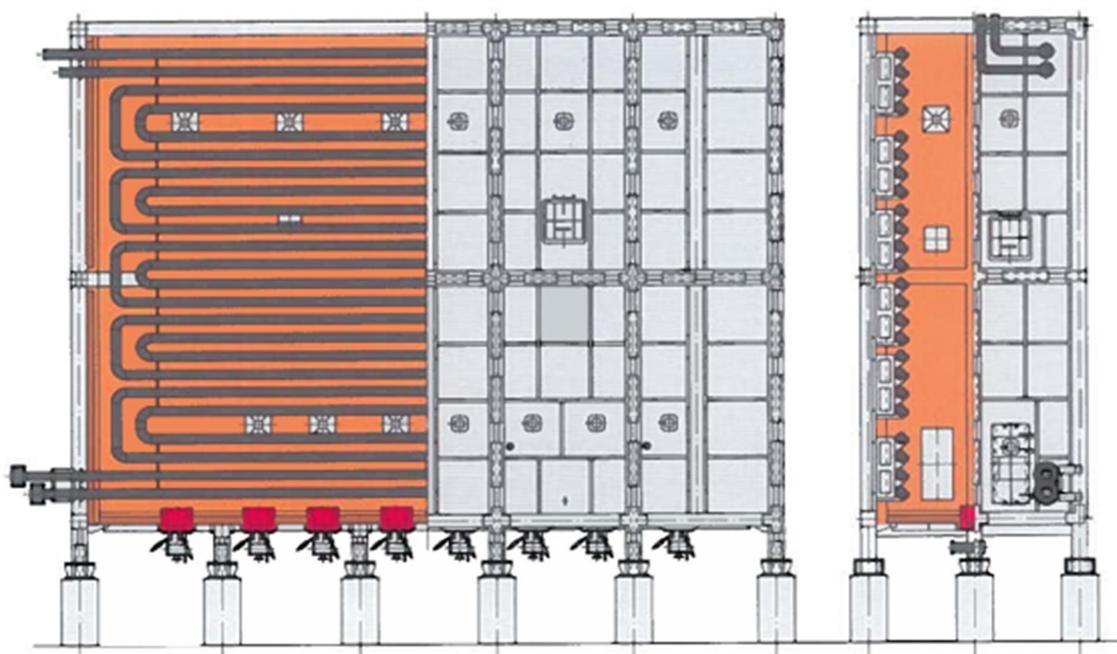


Рисунок 2- Общий вид камеры радиации

Две наиболее крупные группы, на которые разделяются печи по происходящему в них процессу:

- нагревательные печи;
- реакционные печи.

Нагревательных печей подавляющее большинство. Из названия понятно, что в нагревательных печах продукты нагреваются без изменения химического состава продукта. В реакционных печах происходит изменение химического состава продукта.

Основной процесс в печи-теплопередача от продуктов горения топлива к трубному экрану змеевика, через который с определенной скоростью прокачивается продукт.

Одна из самых больших групп в классификации печей определяется по геометрии змеевика.

Различают змеевики:

- с вертикальным расположением труб (рисунок 3);
- с горизонтальным расположением труб (рисунок 4);
- спиральные змеевики (рисунок 5);
- с арочным расположением труб (рисунок 6).

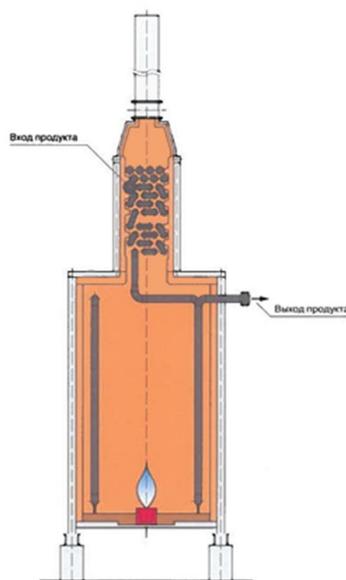


Рисунок 3-коробчатая печь с вертикальным однопоточным змеевиком

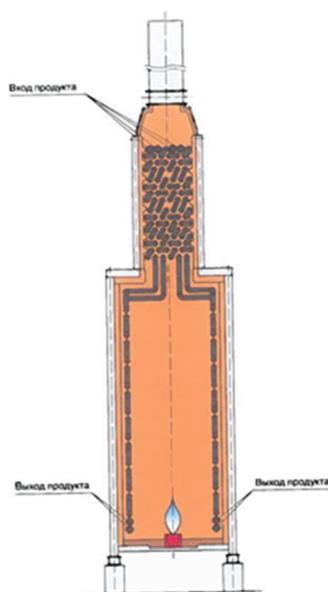


Рисунок 4- коробчатая печь с горизонтальным четырехпоточным змеевиком

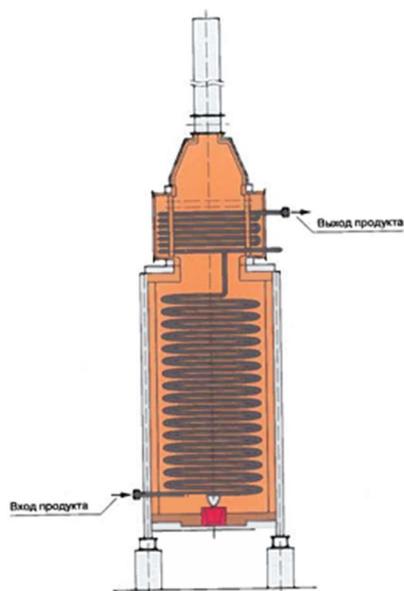


Рисунок 5- цилиндрическая печь со спиральным змеевиком

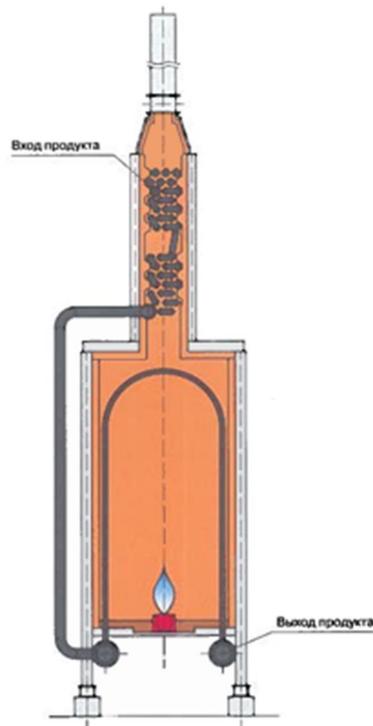


Рисунок 6- коробчатая печь с арочным коллекторным змеевиком

Для повышения эффективности теплообмена сырье в змеевик подают в «противоток» с движением теплового потока (дымовых газов) печи. То есть сырье подают в наиболее холодный ряд камеры конвекции, выходит сырье из камеры радиации (рисунок 3, рисунок 4). В редких случаях, когда необходимо обеспечить наиболее мягкий нагрев продукта с минимальным теплонапряжением, используют «прямоточную» схему подачи сырья (рисунок 5).

Следующая применяемая классификация-по геометрии печи.

Различают:

- цилиндрические печи (эта компоновка обеспечивает на и большую равномерность нагрева змеевика при одностороннем обогреве и наименьшую материалоемкость каркаса-кожуха печи). Сегодня эта компоновка наиболее распространена. Ограничения по применению этой компоновки связаны, в первую очередь, с мощностью печи (как правило, максимально до 15 Гкал/час), и при нагреве вязких, тяжелых фракции в процессах замедленного коксования (рисунок 7);

- овалыные печи (эта компоновка совмещает преимущества цилиндрической печи по равномерности нагрева и практически неограниченные тепловые мощности печи), достаточно редко используемая сегодня компоновка;

- коробчатые печи;

По количеству камер различают:

- однокамерные печи;

- многокамерные печи.

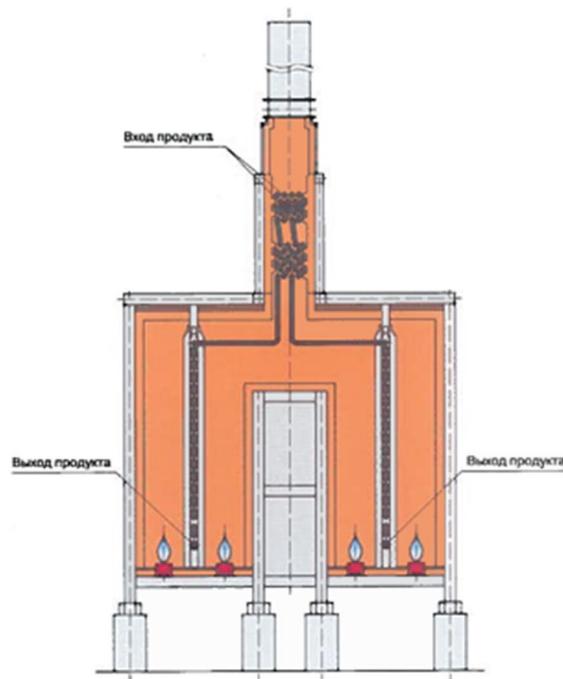


Рисунок 7- коробчатая печь с центральным расположением змеевиков

В большинстве печей змеевик расположен по стенам камеры радиации печи и тепловой поток от горелки идет с одной стороны змеевика (односторонний нагрев). В случае, если необходим более «мягкий» нагрев до высоких температур (близких к максимальным температурам эксплуатации металла змеевика), применяют центральное расположение змеевика в камере радиации, горелки располагают с обеих сторон трубного экрана (двухсторонний нагрев).

По поточности змеевики разделяют на:

- однопоточные;

- многопоточные (как правило, не более восьми);

- коллекторные.

Многопоточные и коллекторные змеевики применяют, когда необходимо создать в печи минимальный перепад давления при прохождении продукта. Проектирование таких змеевиков требует особого внимания и опыта для определения оптимальной геометрии змеевика, топочного пространства, скоростей продукта в каждом потоке.

Определенные требования к печам налагает технологический процесс, в котором они эксплуатируются.

По типу нагреваемых продуктов разделяют печи для нагрева:

- жидких продуктов;
- газообразных продуктов;
- смеси пар - жидкость.

Различают печи также по типу и расположению горелок.

Выделяют следующие печи по расположению горелок:

- подовое расположение,
- сводовое расположение;
- торцевое расположение;
- расположение на боковых стенах;
- многоярусное расположение горелок.

По типу горелок, форме факела различают печи с:

- факельными горелками;
- узкофакельными горелками;
- настильными горелками подовой установки;
- настильными горелками, установленными на стенах,
- инъекционными (с естественной тягой) горелками;
- дутьевыми (с принудительным наддувом) горелками.

За последние двадцать лет произошел определенный прогресс в области развития горелочных устройств практически всех типов.

## 2.3 Горелочные устройства

Газовыми горелками или газогорелочными устройствами называются устройства, предназначенные для образования необходимых смесей газа с окислителем (воздухом), подачи их к месту сжигания и организации процесса горения (с целью преобразования химической энергии газа в тепловую) в соответствии с требованиями технологических процессов.

В ряде случаев газовые горелки служат для подачи в камеру сжигания только газа или отдельно газа и воздуха, без их смешения или с частичным смешением внутри горелки или на выходе из нее.

В настоящее время используется значительное количество различных газогорелочных устройств, отличающихся по конструкции, способу подачи газа и воздуха, давлению и методу сжигания газа, температуре воздуха и другим признакам.

Газогорелочные устройства можно классифицировать по-разному, если брать за основу следующие признаки и характеристики:

1. способ подачи газа и воздуха;
2. способ смешения газа с воздухом;
3. способ сжигания газа и форма факела;
4. величину давления газа и воздуха или смеси перед горелкой;
5. теплоту сгорания газа;
6. целевое назначение горелок или агрегат, для которого они предназначаются;
7. дополнительный или резервный вид топлива.

Классификация по подаче воздуха. В основу классификации положен способ подачи воздуха в горелку, нашедший отражение в ее конструкции.

Классификация предусматривает 5 типов горелок:

- а) диффузионные;
- б) инжекционные;
- в) смесительные с принудительной подачей воздуха;
- г) комбинированные (газозапутные, пылегазовые и др.);

д) газотурбинные.

По давлению газа горелки делятся на горелки низкого давления - до 500 мм вод. ст.; горелки среднего давления – свыше 500 мм вод. ст. до 1 кгс/см<sup>2</sup>; горелки высокого давления — свыше 1 кгс/см<sup>2</sup>.

Также существуют классификации горелочного устройства по следующим основным признакам.

1. Подготовка горючей смеси:

- а) с полным предварительным перемешиванием газа и воздуха;
- б) с частичным предварительным перемешиванием газа и воздуха;
- в) без предварительного перемешивания газа и воздуха.

2. Способ подачи газовой смеси:

а) инжекция; газ инжектирует воздух; воздух под давлением, близким атмосферному;

б) инжекция; воздух инжектирует газ; газ - под атмосферным давлением;

в) инжекция; инжектирующая среда - воздух или газ под давлением;

г) смесительная коробка; воздух и газ - под давлением;

д) механическое предварительное перемешивание; воздух и газ под давлением, близким атмосферному;

е) газ под давлением; воздух - под действием естественной тяги или подсоса струей;

ж) газ и воздух - под давлением, близким атмосферному;

з) газ и первичный воздух - под давлением; вторичный воздух - под действием естественной тяги или подсоса струей.

3. Характеристика выходного сечения, потока и метода стабилизации:

а) отверстия (круглые, щелевые) одиночные или ряд отверстий;

б) стабилизация дополнительными факелами;

в) стабилизация свободной или ограниченной турбулентностью (в ограниченных или свободных струях);

г) прямоочное течение;

д) закрученный поток;

- е) вихревое течение;
- ж) вращательное движение.

## **2.4 Варианты модернизации трубчатой печи**

Конструктивные улучшения трубчатых печей позволяют значительно повысить их эффективность, надежность и экологичность. Наиболее перспективные направления:

- Оптимизация теплообменных поверхностей (змеевики, турбулизаторы).
- Использование современных материалов и покрытий.
- Модернизация горелочных систем и футеровки.

Рассмотрим примеры модернизации горелочных устройств возможные конструктивные исполнения.

### *Горелочная голова для повышения КПД*

Горелочная голова горелочного устройства включает в себя корпус, в котором коаксиально установлен цилиндрический газовый коллектор с центральным каналом, центральный диск-диффузор, регулировочное кольцо, установленное на внутренней поверхности корпуса с возможностью перемещения относительно продольной оси горелочной головы, при этом корпус снабжен диффузорно-конфузорной выходной насадкой; цилиндрический газовый коллектор установлен в корпусе с образованием кольцевого канала для подачи периферийного воздушного потока в зону горения; на внешней поверхности цилиндрического газового коллектора по окружности размещены аксиальные лопатки, установленные под углом 30-40° к продольной оси горелочной головы; в выходной части цилиндрического газового коллектора выполнены, распределенные по окружности, группы сопловых отверстий, предназначенные для подачи газообразного топлива в периферийный воздушный поток, причем за каждой группой отверстий установлен обтекатель; в центральном диске-диффузоре выполнены центральное отверстие, радиальные щелевые прорезы и не менее четырех групп радиально размещенных отверстий по меньшей мере по два отверстия в каждой группе; центральный диск-диффузор

установлен в корпусе с образованием кольцевого зазора между диффузорным участком выходного насадка, величина которого регулируется за счет продольного перемещения регулировочного кольца. Технический результат - повышение эффективности горелочного устройства, в частности КПД, за счет обеспечения устойчивого воспламенения топлива в рабочем диапазоне нагрузок котла от 40 до 100% от номинальной мощности и полного выгорания топлива в объеме жаровой трубы котла с минимальным химическим недожогом и повышение экологичности горелочного устройства за счет понижения эмиссии оксидов азота при сжигании топлива.

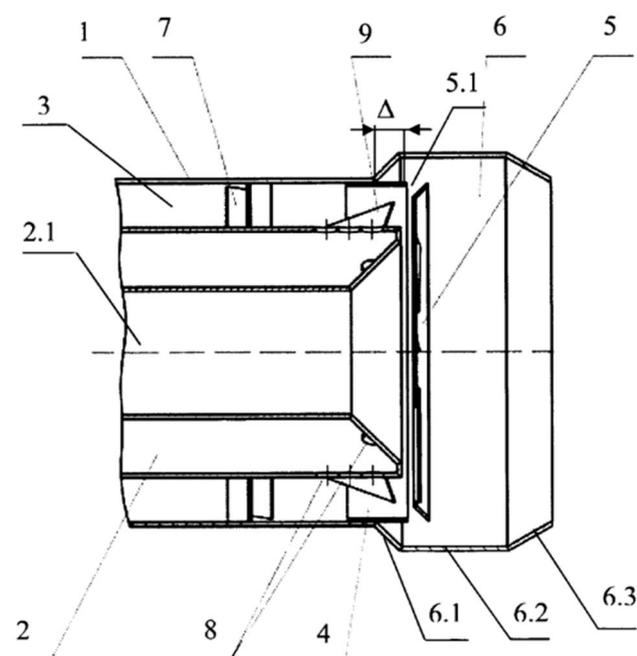


Рисунок 8- Горелочная голова

*Горелочное устройство с центробежным смесителем*

Горелочное устройство содержит смеситель 1 с центробежной форсункой 2 и завихрителем 3 воздушного потока. Смеситель 1 на выходе разделен перегородками 4 на плоские каналы 5 для топливовоздушной смеси, внутри которых установлены стабилизаторы 6 пламени.

Горелочное устройство работает следующим образом.

В смеситель 1 через завихритель 3 подается закрученный воздух, а через форсунку 2 - топливо. Полученная топливовоздушная смесь поступает в плоские каналы 5 и равномерно сгорает, стабилизируясь в стабилизаторах 6 пламени. Установка перегородок 4 уменьшает время сгорания и интенсифицирует процесс горения.

Таким образом, разделение смесителя на выходе перегородками на плоские каналы для топливовоздушной смеси, внутри которых установлены стабилизаторы пламени, повышает эффективность сжигания топлива. Формула изобретения Горелочное устройство, содержащее смеситель с центробежной форсункой и завихрителем воздушного потока, отличающееся тем, что, с целью повышения эффективности сжигания топлива, смеситель на выходе I.

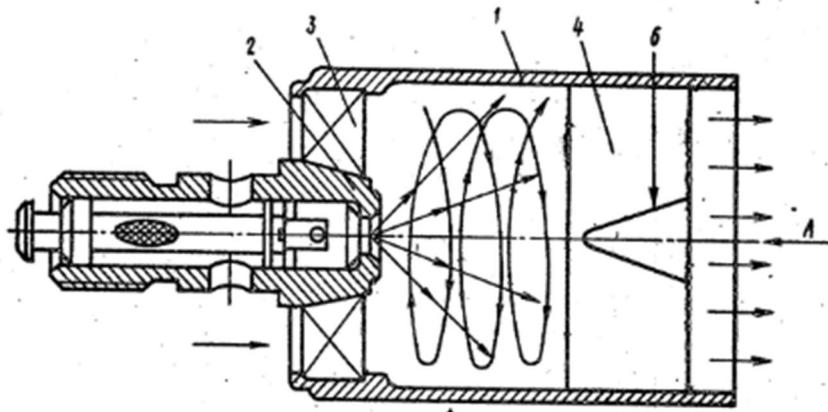


Рисунок 9- Горелочное устройство с центробежным смесителем

#### *Горелочное устройство с кольцевой обечайкой*

Согласно изобретению в горелочном устройстве, содержащем центральную топливную форсунку, коаксиальные кольцевые обечайки, образующие воздухоподводящие каналы, снабженные разнонаправленными лопаточными завихрителями с установленными на выходе из каждого канала коническими отражателями, топливоподающие отверстия центральной форсунки размещены под обрезом конических отражателей, наружная обечайка выполнена в виде топливного коллектора, топливоподающие отверстия которого направлены перпендикулярно отверстиям центральной форсунки, а конические отражатели установлены с возможностью отклонения воздушных потоков от центра к периферии. Площади проходных сечений рядов разнонаправленных

лопаточных каналов по направлению от центра к периферии соотносятся как 1: 2, 5:4, а конические отражатели воздухоподающих каналов установлены так, что площади проходных сечений выпускной части этих каналов не превышают площади сечений лопаточных завихрителей.

Технический результат при осуществлении изобретения выражается в ускорении процесса перемешивания топлива с воздухом и интенсификации выгорания топлива со значительным снижением эмиссии вредных веществ. При этом повышается КПД устройства в целом.

Установка конических отражателей на выходе из коаксиальных воздухоподводящих каналов, отклоняющих закрученные потоки воздуха от осевого движения и направляющих эти потоки радиально от центра к периферии, позволяет создать систему веерных закрученных потоков воздуха и в сочетании с указанным направлением струй топлива организовать плоский факел.

При этом размещение центральной форсунки под нижним обрезом кольцевых обечаек, выполнение наружной обечайки в виде коллектора, определенное соотношение сечений рядов разнонаправленных лопаточных каналов как в радиальном направлении устройства, так и в выпускной части этих каналов в совокупности позволяет рационально решить проблему равномерного смешения топлива с окислителем и обеспечить эффективное сгорание.

Работа горелочного устройства осуществляется следующим образом. Топливо поступает из центральной топливной форсунки 1 в камеру сгорания 16 параллельно потокам воздуха в виде системы струй, смешивающихся с воздухом, выходящим из разнонаправленных лопаточных каналов 10, 11, 12. При этом потоки воздуха отклоняются в радиальном направлении от центра к периферии коническими отражателями 13 и распространяются в виде плоских закрученных веерных струй вдоль торцевой стенки 15 камеры сгорания 16. В зонах контакта веерных струй резко возрастает интенсивность турбулентности потока, что обеспечивает быстрое перемешивание воздуха с топливом и выгорание смеси с малым временем пребывания в высокотемпературной зоне факела. Поскольку веерные струи характеризуются большим отношением

поверхности к объему и именно на этих поверхностях происходит выгорание факела, он быстро охлаждается и горение происходит при пониженных температурах, что наряду с относительно малым временем пребывания позволяет существенно уменьшить эмиссию вредных веществ, что подтверждается графиком фиг.2.

Подача части топлива (до 80%) из коллектора 3 позволяет еще более ускорить перемешивание и выгорание топлива и дает возможность перейти от разомкнутого факела к плоскому. Таким образом, перераспределяя подачу топлива от центра к периферии, можно управлять формой факела. При этом повышается КПД устройства и улучшаются экологические условия эксплуатации.

Предложенное горелочное устройство позволяет управлять формой факела и создать плоский или рассредоточенный факел в зависимости от формы камеры сгорания в широком диапазоне нагрузок с низким уровнем эмиссии вредных выбросов.

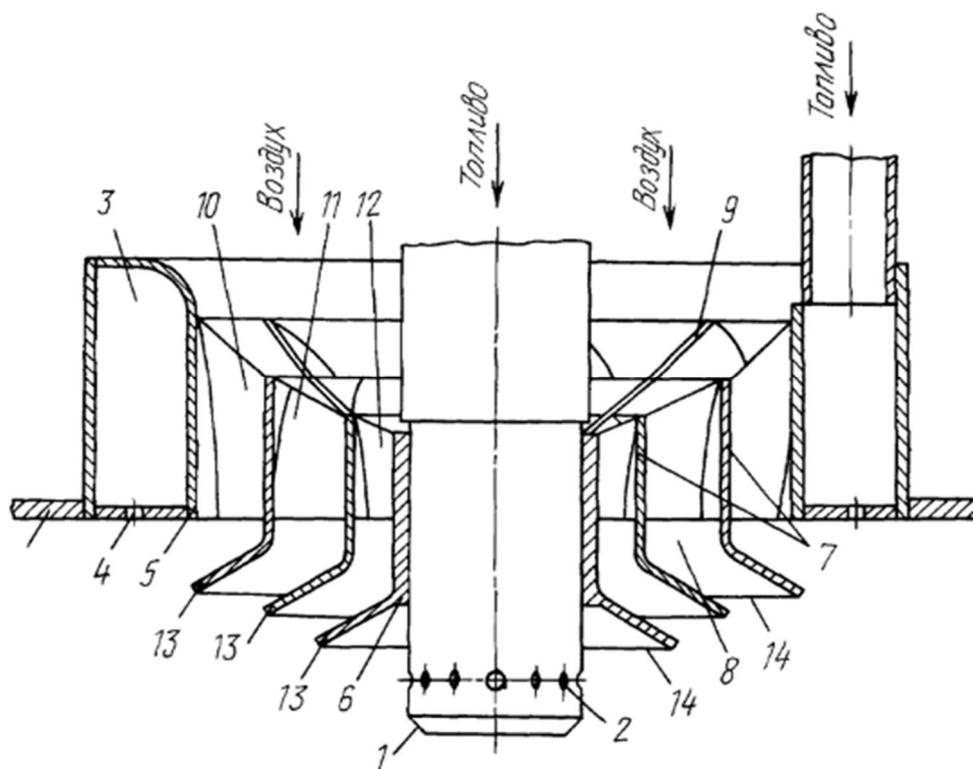


Рисунок 10- Горелочное устройство с кольцевой обечайкой