

**Федеральное агентство по образованию**

**Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования**

**Северо–Западный государственный заочный технический университет**

**ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ**

**Кафедра теплотехники и теплоэнергетики**

**Е.А.БЛИНОВ**

**ТОПЛИВО И ТЕОРИЯ ГОРЕНИЯ**

**Раздел - подготовка и сжигание топлива**

**Учебно-методический комплекс  
(Учебное пособие)**

**Санкт – Петербург  
Издательство СЗТУ  
2007**

Утверждено редакционно-издательским советом университета  
УДК 662.931

**Блинов, Е.А. Топливо и теория горения. Раздел - подготовка и сжигание топлива:** Учеб.-метод. комплекс (учеб. пособие)/ Е.А. Блинов. – СПб.: Изд-во СЗТУ, 2007. - 119 с.

Учебное пособие соответствует государственным образовательным стандартам высшего профессионального образования по специальностям 140101.65 – «Тепловые электрические станции», 140104.65 – «Промышленная теплоэнергетика» и направлению подготовки бакалавра 140100.62 - теплоэнергетика.

В учебном пособии приведены сведения о подготовке жидкого и газообразного топлива к сжиганию, рассмотрены вопросы горения одиночной капли и горения жидкого и газообразного топлив в факеле, организация горения, режимы горения. Приведены сведения о форсунках, газовых горелках, газомазутных горелочных устройствах. Учебное пособие может быть использовано при изучении дисциплин: «Котельные установки и парогенераторы», «Технология централизованного производства электроэнергии и теплоты», «Технологические энергоносители предприятий», «Энергоснабжение».

Рецензенты: кафедра промышленной теплоэнергетики Санкт-Петербургского государственного технического университета (зав. кафедрой **В.М.Боровков**, д-р техн. наук, проф.); кафедра промышленной теплоэнергетики Санкт-Петербургского государственного технологического университета растительных полимеров (зав. кафедрой **А.П.Бельский**, д-р техн. наук, проф.).

## ВВЕДЕНИЕ

В топочных процессах промышленного характера в качестве топлива используют естественные и искусственные органические вещества [1]. В качестве окислителя используют в основном атмосферный воздух. По скорости окисления топлива можно выделить три процесса: медленное окисление, быстрое окисление и сверхбыстрое окисление (взрыв). В настоящей работе рассматриваются процессы быстрого окисления в высокотемпературной области, называемые горением.

Горение представляет собой цепную самоускоряющуюся реакцию, возникающую после появления в горючей смеси активных центров. Время, в течение которого возникает достаточное для протекания реакции количество активных центров, называется периодом индукции  $\tau_{\text{инд}}$ . После него следует возникновение фронта воспламенения и горение при постоянном давлении [2].

Устройство, подготавливающее горючую смесь и стабилизирующее фронт воспламенения, называется горелкой.

Топочное устройство представляет собой сочетание горелки (или нескольких горелок) с топочной камерой, предназначенной для завершения процесса горения и предотвращения влияния на этот процесс внешних воздействий. Горелки и топочная камера реализуют непрерывные процессы, в которых участвуют потоки топлива, воздуха и топочных газов.

Процессу горения предшествует непосредственный контакт молекул топлива и окислителя. При ламинарном движении потоков газообразного топлива и воздуха смешение их лимитируется очень медленной молекулярной диффузией. В этом случае процесс смесеобразования, а значит и горения, не может быть использован в промышленных установках. Для ускорения смесеобразования производится турбулизация потоков горючего и окислителя. В зависимости от степени турбулизации зона образования горючей смеси будет иметь различные протяженность и интенсивность, а это, в свою очередь, определяет интенсивность процесса горения и размеры топочной камеры.

Для воспламенения горючей смеси и поддержания устойчивого горения недостаточно только образовать смесь. Существующая смесь, а также вновь образующиеся и поступающие в зону горения порции её, должны быть прогреты до температуры, обеспечивающей быстрое развитие реакции горения.

Рассмотренные положения по организации и поддержанию горения вполне достаточны для смеси газообразного топлива и окислителя. Жидкое топливо перед сжиганием должно пройти ряд последовательных подготовительных процессов, в результате которых топливо будет доведено до "молекулярного" измельчения. Так, жидкое топливо предварительно измельчается механически, затем мелкие капли при нагревании испаряются; сгорает гомогенная смесь молекул паров топлива и окислителя.

Задачей изучения процессов горения является познание закономерностей этих процессов с целью управления ими и создания экономичных и надежных устройств для сжигания топлива с минимальным количеством вредных выбросов (зола, оксидов азота и серы и др.) в дымовых газах.

# 1. СЖИГАНИЕ ЖИДКОГО ТОПЛИВА

## 1.1. Подготовка жидкого топлива к сжиганию

В качестве жидкого топлива в стационарных и мобильных энергетических установках используются мазуты различных марок, мартеновское топливо, стабилизированная нефть, соляровое и сланцевое масло и легкие топлива (керосин, соляр, бензин и др.) Наиболее распространенным топливом для сжигания в печах, промышленных и энергетических котлах является мазут. Мазуты характеризуются значительной вязкостью, плотностью, содержанием высокомолекулярных веществ и смол [1].

Доставка мазута на электростанции и промышленные котельные производится железнодорожным, водным, автомобильным транспортом и по трубопроводам. По трубопроводам мазут доставляется в случае расположения котельных и ТЭС вблизи от нефтеперерабатывающих заводов или магистральных мазутопроводов. Автомобильным транспортом мазут доставляется в промышленные и отопительные котельные и небольшие электростанции при незначительных расстояниях от места получения топлива. Доставка потребителю мазута водным транспортом производится только при отсутствии других возможностей, т.к., несмотря на дешевизну этого способа (в 4...5 раз дешевле по сравнению с другими), сезонность его в связи с замерзанием водоемов вызывает необходимость строительства больших емкостей для хранения топлива в зимний период.

При доставке мазута по железной дороге топливо сливается в приемно-сливные устройства (рис. 1.1).

Для слива мазута требуется разогрев его до температуры 30°C для мазута марки 40 (40 В) и 60°C для мазута марки 100 (100 В). Существует несколько способов слива мазута в сливной желоб: при разогреве топлива "открытым паром", при разгрузке цистерн в закрытых помещениях - тепляках, слив с рециркуляционным подогревом горячим мазутом, слив из цистерн с паровой рубашкой, слив мазута под избыточным давлением.

Мазутные хозяйства бывают основными и растопочными. Основным мазутное хозяйство называют в случае, когда ТЭС или котельная работают только на мазуте, мазуте и газе или при использовании мазута в качестве резервного топлива. Если мазут используется в качестве растопочного топлива или для подсветки факела (на пылеугольных ТЭС), то мазутное хозяйство называют растопочным.

В состав мазутного хозяйства входят: приемно-сливные устройства; мазутохранилища (приемные и основные емкости); мазутонасосная (с насосами, подогревателями, фильтрами); паромазутопроводы; система жидких присадок (емкости, подогреватели, насос-дозатор); система пожаротушения.

Схемы мазутного хозяйства бывают циркуляционные, тупиковые и комбинированные (тупиково-циркуляционные); комбинированная схема (рис. 1.2) применяется при использовании любых мазутов и при различных режимах работы котельной, но особенно удобна, когда котельная работает на маловязких

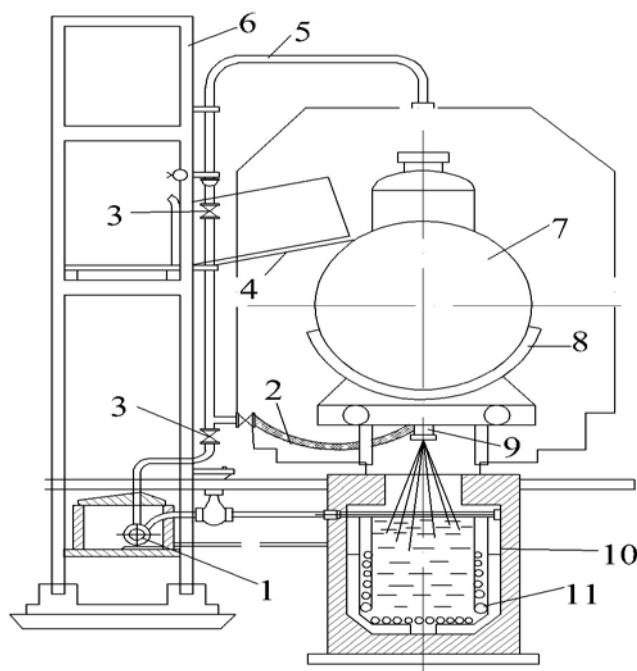


Рис. 1.1. Приемно-сливное устройство:

1 - паропровод; 2 - паровой шланг; 3 - запорные вентили; 4 - перекидной мостик; 5 - поворотная колонка для присоединения шланга при разогреве мазута открытым способом; 6 - стояк эстакады; 7 - железнодорожная цистерна; 8 - паровая рубашка; 9 - сливное устройство; 10 - желоб сливной; 11 - трубчатые подогреватели

топливах с переменными нагрузками при частых переходах с мазута на газ. При закрытом клапане 23 котельная работает по тупиковой схеме, при открытом - в работу включается обратная линия и котельная работает по циркуляционной схеме. На рециркуляцию дается около 15% мазута от его количества, поступающего к котлам. Расход топлива, потребляемого котлами, определяется по разности показаний мазутомеров, установленных на прямой линии (позиция б, рис. 1.2) и на обратной (позиция 22). Прямая и обратная линии изолируются вместе с паровой линией подогревателей мазутного хозяйства. Давление в мазутопроводе котельной регулируется сливным клапаном 8. Переход на работу по тупиковой схеме производится при эксплуатации котельной на стабильных нагрузках. В этом случае помимо клапана 23 закрываются также вентили на мазутопроводах за горелками котлов. При остановке котлов эти вентили открываются.

Жидкие топлива перед сжиганием должны пройти цикл специальной подготовки. Это необходимо для эффективного сжигания с одновременным обеспечением надежности топочного устройства, хвостовых поверхностей нагрева, уменьшения загрязняющих выбросов. Подготовка включает в себя следующие мероприятия: первичный подогрев для обеспечения вязкости, необходимой при транспортировке; фильтрация; обработка присадками; обессоливание; обеспечение рабочего давления перед сжиганием; подогрев до вязкости, необходимой для оптимальной работы форсунок.

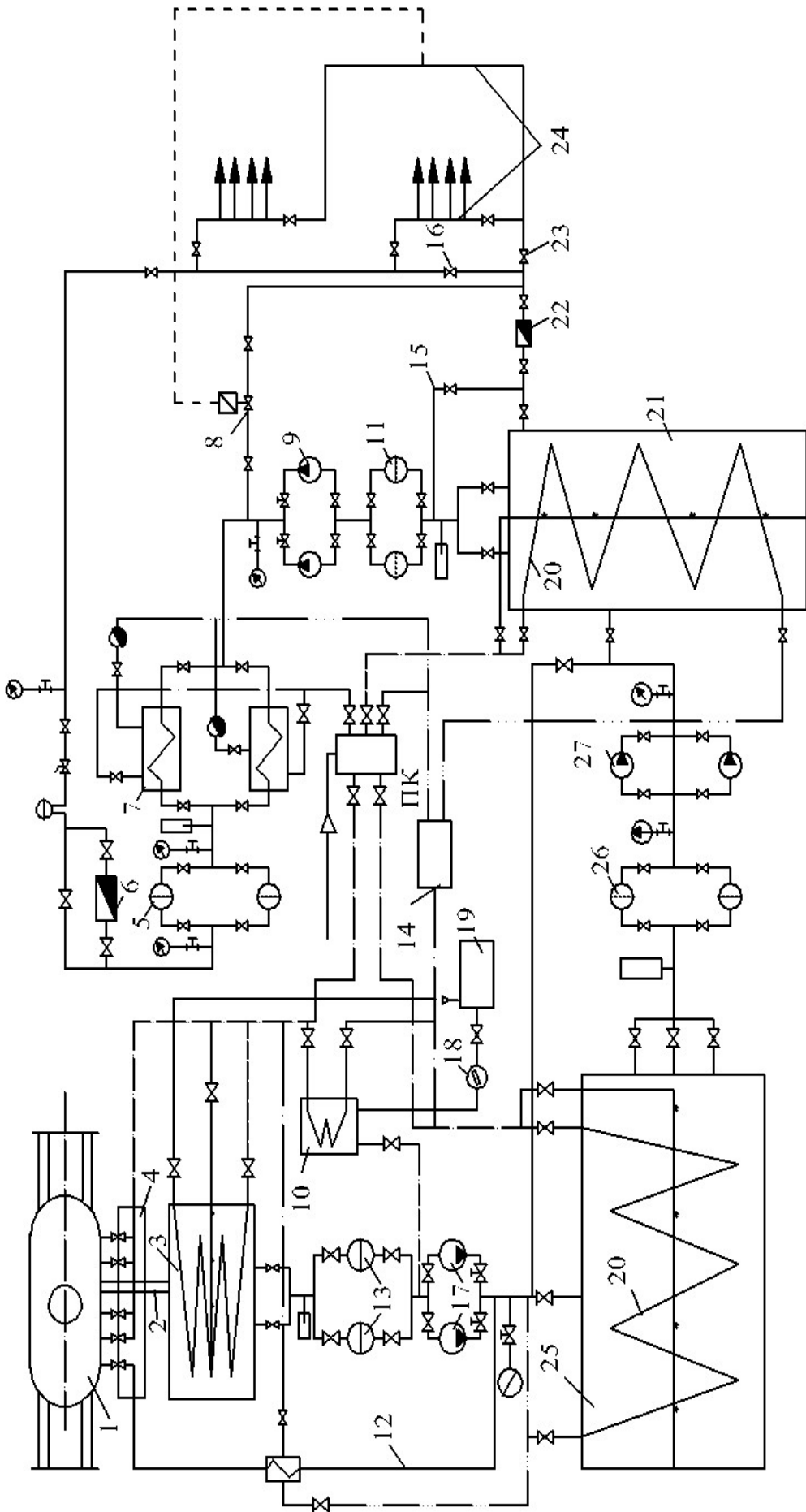


Рис. 1.2. Комбинированная схема мазутного хозяйства: 1 – цистерна; 2 – желоб сливной; 3 – приемная емкость; 4 – эстакада; 5 – фильтр тонкой очистки; 6 и 22 – мазутомеры; 7 и 20 – паровые подогреватели; 8 – клапан сливной; 9 и 27 – насосы; 10 – подогреватель жидких присадок; 11, 13 и 26 – фильтры грубой очистки; 12 – линия рециркуляции мазута на разогрев цистерны; 14 – конденсатный бак; 15 – линия возврата мазута к насосам; 16 – клапан рециркуляции мазута мимо котлов; 17 – насос перекачивающий; 18 – насос-дозатор; 19 – бак жидких присадок; 21 – расходная емкость; 23 – клапан рециркуляции мазута; 24 – участок циркуляционный; 25 – основная емкость; ПК – паровой коллектор

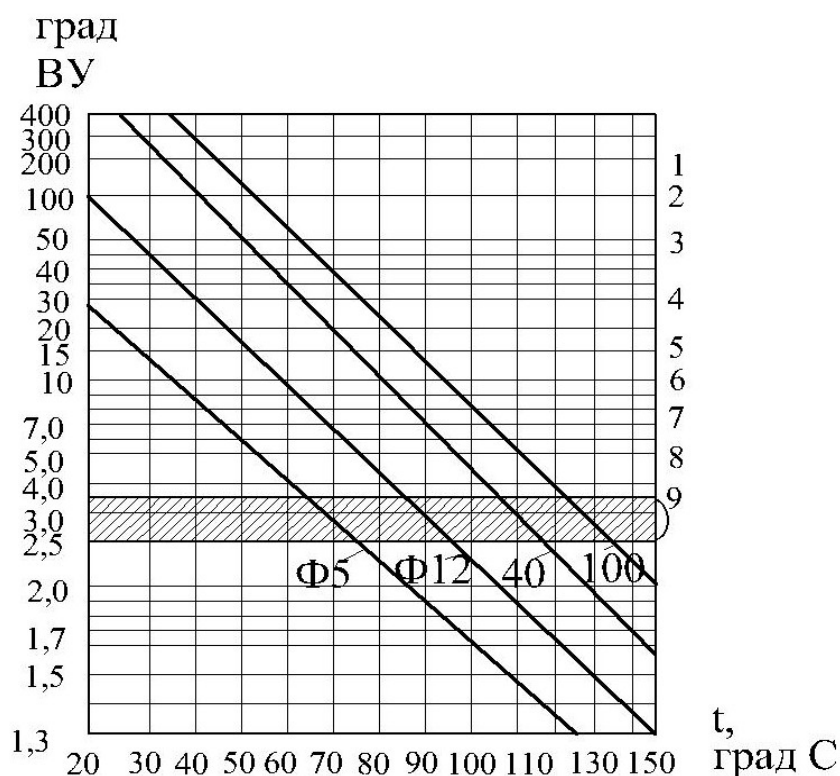


Рис. 1.3. Зависимость вязкости мазутов от температуры:

1 - максимальная допустимая вязкость при сливе мазута 40 и транспортировании мазута винтовыми шестеренчатыми насосами; 2 - то же при транспортировании мазута поршневыми и скальчатыми насосами; 3 - вязкость при сливе мазута 100; 4 - максимальная вязкость для центробежных насосов; 5 - максимальная вязкость перед ротационными и паровыми форсунками и в главной циркуляционной системе; 6 – то же перед пневматическими форсунками высокого и низкого давления; 7 -максимальная вязкость перед механическими форсунками, рекомендуемая вязкость перед паровыми форсунками; 8 - рекомендуемая вязкость перед пневматическими форсунками высокого и низкого давления, а также перед центробежными форсунками; 9 - зона рекомендуемых вязкостей перед центробежно-механическими форсунками.

Первичный подогрев для обеспечения вязкости, необходимой при транспортировке. Условия сливных и наливных операций, транспортировки мазутов, а также эффективность работы форсунок определяются вязкостью мазута. Вязкость мазутов в значительной степени зависит от температуры, поэтому необходимо, чтобы мазут был нагрет до определенной температуры в соответствии с условиями его использования. Недогрев топлива ухудшает транспортирование его по трубам, ухудшает качество распыливания; перегрев может привести к испарению, вспениванию, вследствие чего возможно воспламенение топлива в баках, пульсационному режиму работы форсунок, ухудшению работы насосов. На рис. 1.3 приведена номограмма зависимости вязкости некоторых мазутов от температуры по ГОСТ 10585-75, здесь же показаны примерные значения вязкости, которые необходимо обеспечивать для оптимальной работы мазутно-

го хозяйства и горелочных устройств. Подогрев мазута в приемной, основной и расходной емкостях (позиции 3, 25 и 21 рис. 1.2) осуществляется змеевиковыми подогревателями и открытым паром. Подогреватели устанавливаются в непосредственной близости от заборных патрубков основных и циркуляционных насосов.

Фильтрация мазута. Для очистки мазута от механических примесей используются фильтры грубой и тонкой очистки. В зависимости от конструкции фильтры бывают щелевые, шариковые и сетчатые. На рис. 1.4 приведена конструкция сетчатого фильтра мазута. Грубые сетчатые фильтры имеют от 5 до 64 отверстий на  $1 \text{ см}^2$  фильтрующей поверхности, фильтры тонкой очистки - от 64 до 400 отверстий на  $1 \text{ см}^2$ . Фильтры грубой очистки устанавливаются перед топливными насосами, фильтры тонкой очистки - перед форсунками (см. рис. 1.2). Необходимая степень фильтрации жидкого топлива определяется используемым оборудованием мазутного хозяйства и типом форсуночных устройств. Снижение требований к фильтрации не допускается, минимальный размер отфильтрованных частиц не должен превышать 5 мкм.

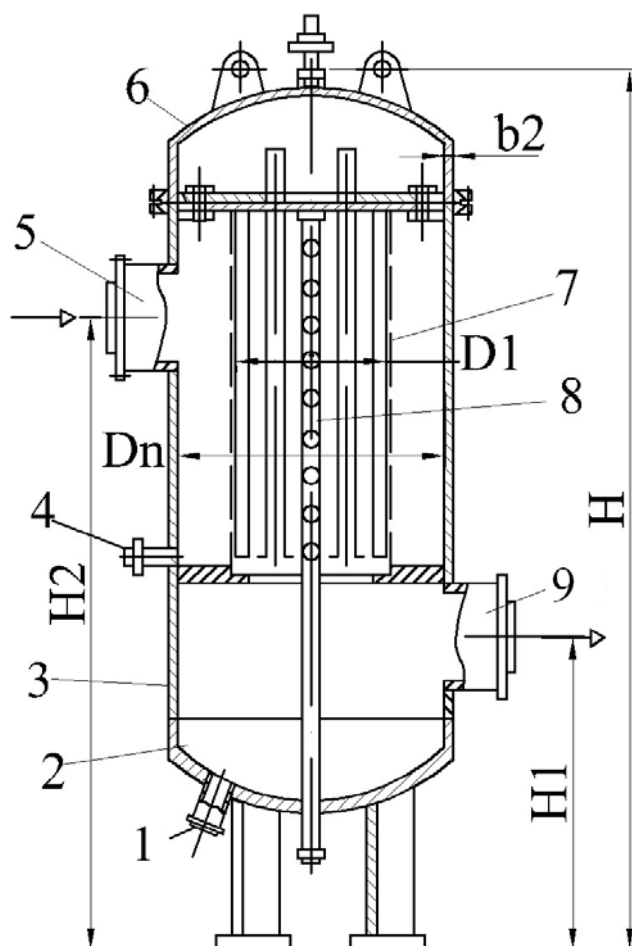


Рис. 1.4. Сетчатый фильтр мазута:

1 - штуцер опорожнения; 2 и 6 - днища; 3 - корпус; 4 - продувочный штуцер; 5 - патрубок входа мазута; 7 - фильтрующая сетка; 8 - коллектор продувки сетки паром; 9 - патрубок выхода мазута



Обработка присадками и обессоливание. Мазут является очень сложной по химическому составу смесью высокомолекулярных органических, гетероорганических и металлоорганических соединений. В структурном отношении мазут представляет собой многофазную дисперсную систему. К частицам дисперсной фазы относятся высокоплавкие парафиновые углеводороды, карбены и карбоиды, твердые минеральные примеси, глобулы воды, газовые пузырьки. Осаждение частиц дисперсной фазы и образование трудноудаляемых отложений приводит к определенным трудностям на всех стадиях транспортирования, хранения и сжигания мазута. Карбоиды и минеральные примеси вызывают абразивный износ насосов, арматуры и форсунок. Присутствие глобул воды усложняет эксплуатацию мазутного хозяйства, отрицательно влияет на полноту сгорания, дестабилизирует процесс горения и может привести к срыву факела. Наличие в мазуте вредных примесей вызывает генерацию производных соединений, коррозию и загрязнение рабочих поверхностей, уменьшение теплопередачи. Для снижения негативных явлений, возникающих при использовании мазутного топлива, его необходимо подвергать спецобработке на нефтеперегонном заводе или непосредственно перед сжиганием. Существуют следующие методы обработки мазута: гидромеханический, физический и химический.

Гидромеханическая обработка (ГМО) производится в специальных аппаратах (ротационных, струйных, вибрационных и др.), позволяющих создавать тонкодисперсную смесь мазута с вязкими отложениями и с водой. Способ ГМО перспективен при сжигании высокообводненных и крекинг-мазутов. В результате ГМО вода и мазут перемешиваются до микроэмульсии. Поскольку температура кипения воды значительно ниже температуры кипения мазута (280...320°C), то при попадании капель мазута в топочную камеру происходит быстрое испарение эмульгированной в топливе воды, приводящее к микровзрыву капель мазута и к их вторичному дроблению. При этом факел более равномерно распределяется в топочном пространстве, возрастает полнота и скорость сгорания, выравнивается температурное поле, снижается максимум температур в зоне горения, вследствие чего на 30...40% уменьшается образование "термических" оксидов азота. Содержание эмульгированной воды в мазуте рекомендуется 6...12% при дисперсности воды 10...15 мкм.

К физическим методам относится обработка топлива магнитным, электрическим, тепловым и другими физическими полями с целью повышения его дисперсности, стабильности и, в конечном счете, полноты сгорания.

Для обессоливания применяют водную промывку мазута. В мазут вводится пресная вода, создается водно-топливная эмульсия, затем промывочная вода, насыщенная солями (в основном щелочных и щелочноземельных металлов), удаляется с помощью центробежных сепараторов. За рубежом (фирма "Пегролант", США), используется электростатический метод отделения воды непосредственно в топливных емкостях.

Химический метод обработки мазута заключается в использовании присадок. Присадки к мазуту имеют различные назначения.

Депрессорные присадки улучшают текучесть мазута. В качестве депрессантов используют сополимеры этилена с винилацетатом.

Диспергирующие присадки препятствуют образованию смолистых отложений, повышают полноту сгорания топлива. В качестве диспергирующих и противодымных присадок используют соединения Mn, Fe, Cr и др. (катализаторы горения), соединения щелочно-земельных металлов Ba и Ca, алюмосиликаты. Последние ускоряют процесс термоокислительного крекинга топлива, что положительно влияет на полноту сгорания, снижает коррозионную активность дымовых газов; в энергетике алюмосиликаты пока не используются. Антикоррозионные присадки - это соединения Mg, Al, Si, Fe и др. Они взаимодействуют с коррозионно- и адгезионноактивными компонентами продуктов сгорания (соединениями S, V, Na) и переводят их в пассивное состояние. При этом на наружных поверхностях нагрева котла образуются рыхлые легкоудаляемые отложения, резко снижается скорость коррозии металла.

Для котельного топлива используются жидкие присадки ВНИИ НП-102 для обработки мазута при его изготовлении, ВНИИ НП-106 для обработки мазута в местах потребления, «Полифен» (близок по составу и свойствам к присадке ВНИИ НП-106). Эти присадки снижают интенсивность коррозии, уменьшают количество и прочность золовых отложений, снижают вязкость и поверхностное натяжение мазута, связывают атомарный кислород, способствуют выжиганию тяжелых компонентов, уменьшают коксообразование. На ТЭС применяется также жидкая минеральная присадка ВТИ-4 ст, представляющая собой 10%-ный водный раствор хлористого магния  $MgCl_2$ . Она снижает низкотемпературную коррозию, но отложения на поверхностях нагрева трудноудаляемы, и поэтому ряд электростанций отказался от нее.

Присадка, поступающая на электростанцию, выгружается в специальные емкости, где приготавливается рабочий раствор, последний подается в баки хранения жидкой присадки. Из баков насосом-дозатором присадка через фильтры подается на всас мазутных насосов второго подъема (с применением смесителей эжекционного типа) или, как это показано на рис. 1.2, через подогреватель на всас перекачивающих насосов. Дозировка присадок ВНИИ НП:  $2 \pm 0,4$  кг на одну тонну мазута, присадки ВТИ-4 ст:  $0,6 \pm 0,1$  кг  $MgCl_2$  на тонну мазута, температура контакта 70...90°C.

За рубежом применяют присадки на основе Mg, Mn, Si и Al в виде дисперсий в масле.

Обеспечение рабочего давления перед сжиганием. Давление жидкого топлива выбирается, исходя из требуемой дисперсности распыления при необходимой единичной производительности форсунки. Давление мазута перед форсунками условно подразделяются на низкое ( $< 0,7$  МПа), среднее ( $< 3,5$  МПа) и высокое ( $> 3,5$  МПа). Необходимое давление достигается использованием насосов различного типа и назначения.

Шестеренные насосы типа Ш применяются для перекачивания мазута с температурой до 80°C и используются как циркуляционные и основные насосы в промышленных котельных; подача от 0,22 до 9 м<sup>3</sup>/ч, давление от 0,6 до 2,5 МПа.

Винтовые насосы типа ЗВ (трехвинтовые) применяются для перекачивания мазута с температурой до 100°С в мазутных хозяйствах промышленных котельных в качестве основных насосов; подача от 0,45 до 6,84 м<sup>3</sup>/ч, давление от 2,5 до 4 МПа.

Центробежные консольные насосы типа НК для перекачивания мазута с температурой до 80°С применяются на ТЭС как основные насосы и насосы первого подъема, подача от 35 до 560 м<sup>3</sup>/ч, давление от 0,7 до 3,7 МПа.

Для перекачивания мазута с температурой до 200°С как основные и насосы первого подъема применяются на ТЭС центробежные консольные насосы типа НК (подача от 55 до 120 м<sup>3</sup>/ч, давление нагнетания от 0,45 до 1,12 МПа); типа КНК (подача 135 м<sup>3</sup>/ч, давление 0,55 МПа); разъемные центробежные консольные насосы типа Н (подача от 36 до 170 м<sup>3</sup>/ч, давление от 1,05 до 3,38 МПа); разъемные двустороннего входа типа НД (подача от 200 до 450 м<sup>3</sup>/ч, давление от 0,6 до 1,0 МПа).

Разъемные многосекционные насосы типа НПС применяются на ТЭС в качестве основных. Температура перекачиваемого мазута до 200°С, подача от 35 до 200 м<sup>3</sup>/ч, давление нагнетания от 5 до 7 МПа.

В качестве насосов-дозаторов присадок используются насосы типа НД, например, НД-2500/10 с подачей 2,5 м<sup>3</sup>/ч и давлением нагнетания 1,0 МПа.

Подогрев мазута перед форсунками. Перед подачей жидкого топлива в топку оно дополнительно подогревается для обеспечения необходимой вязкости. Температура подогрева мазута определяется маркой мазута и способом распыливания (см. табл.1.1).

Таблица 1.1

**Температура подогрева мазута перед форсунками, °С**

<i>Марка мазута</i>	<i>Форсунки механического распыливания</i>	<i>Форсунки паромеханические</i>	<i>Форсунки ротационные и парового распыливания</i>
100	150 (135)	125	100
100 В	125	115	—
40	120	110	90
40 В	110	100	—
Ф	80	—	80

Пар на мазутоподогреватели (рис. 1.2, позиция 7) поступает из отборов турбин или непосредственно от котла с давлением до 1,6 МПа и температурой до 300°С (насыщенный или слегка перегретый).

Для подогрева мазута используют кожухотрубные подогреватели ПМ и ПМР, секционные кожухотрубные подогреватели, и секционные подогреватели типа «труба в трубе». Диапазоны некоторых рабочих характеристик подогревателей приведены в таблице 1.2.

### Диапазон основных параметров подогревателей мазута

Параметр	Типы подогревателей			
	ПМ	ПМР	Секционные подогреватели	ТТ
Пропускная способность по мазуту, т/ч	6...120	15...400	40...50	до 20
Допустимое давление мазута, МПа	1,0..4,0	1,3..6,4	—	до 6,4
Допустимое давление пара, МПа	1,0..1,3	1,6	0,8	1,0...4
Температура мазута на выходе, °С	95...115	120...135	125...150	до 135
Температура пара на входе, °С	200	300	—	180..250

На рис. 1.5 приведена конструкция подогревателя типа «труба в трубе», применяемого в мазутохозяйствах котельных.

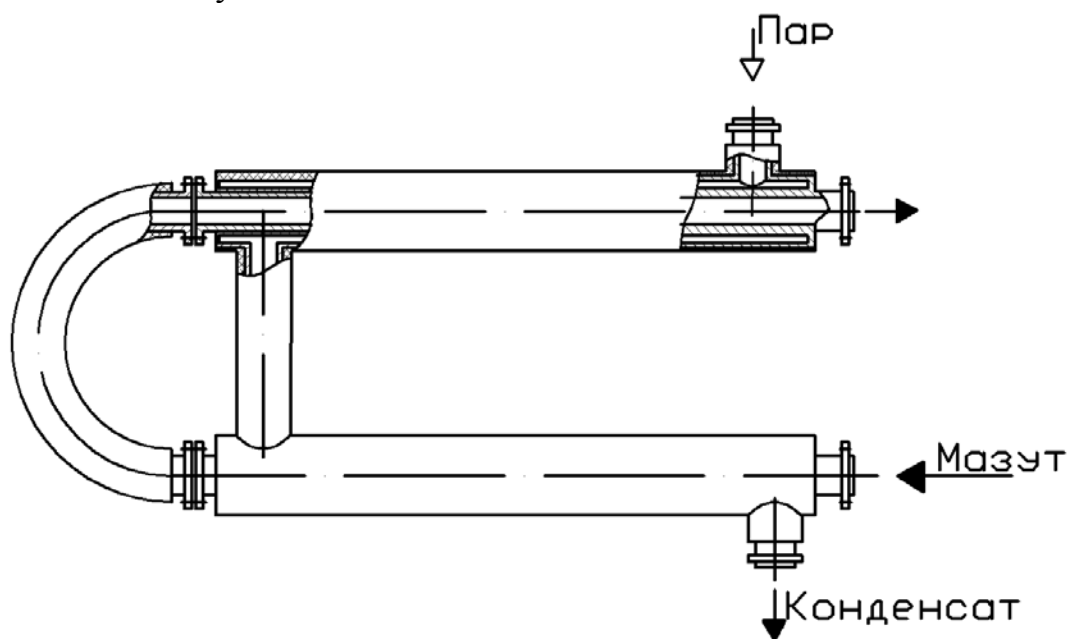


Рис. 1.5. Мазутоподогреватель типа «труба в трубе».

Распыливание жидкого топлива и организация топливовоздушной смеси. Эти операции являются наиболее ответственными в ряду мероприятий по подготовке жидкого топлива к сжиганию в факеле. От качества распыления и образования горючей смеси зависят экономичность и надежность процесса горения при различных режимах работы топочных устройств. Распыливание (дробление на мелкие капли) жидкого топлива производится в форсунках, а организация топливовоздушной смеси - в горелках различных типов и конструкций.

Основные типы форсунок, используемые в настоящее время в энергетике - механические и с распыливающей средой. Механическое распыливание осуществляется при продавливании топлива под значительным напором (1,0...2,0 МПа) через малое отверстие (1...3 мм). Распыливающая часть центробежной форсунки (головка) показана на рис. 1.6. Она состоит из трех основных деталей. В диске 4 происходит дробление топлива на мелкие струйки, в диске 5 струйки завихриваются, в сопловой насадке 6 топливо распыливается.

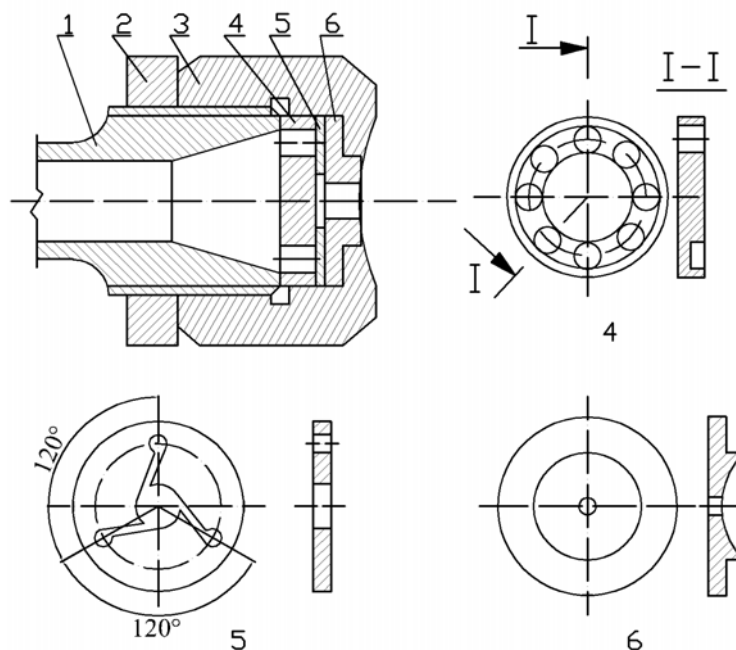


Рис. 1.6. Головка мазутной форсунки с механическим распыливанием:  
1 - наконечник головки; 2 - гайка стопорная; 3 - гайка накидная; 4 - диск распределительный; 5 - диск завихрывающий; 6 - насадка сопловая.

В паровых и пневматических форсунках дробление топлива осуществляется за счет кинетической энергии пара или воздуха. Так, в струйных форсунках ЦКТИ (рис.1.7) дробление и выход мазута осуществляется за счет прямого сноса его кинетической энергией пара и за счет эжекции.

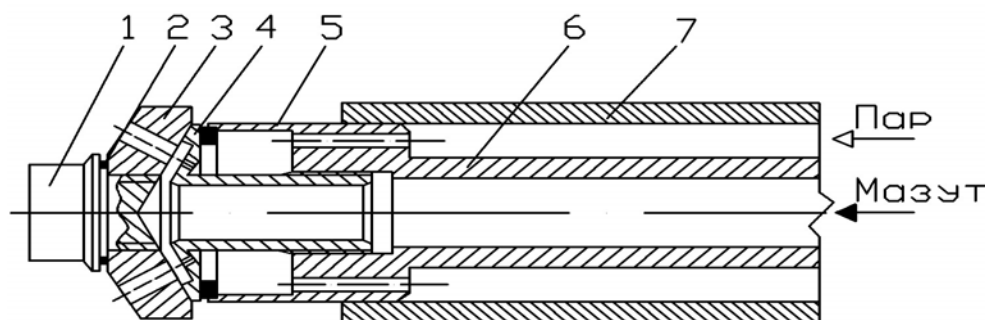


Рис. 1.7. Струйная форсунка ЦКТИ:  
1 – пробка; 2 - прокладка; 3 – распылитель; 4 – коллектор паровой; 5 – корпус;  
6 – топливный ствол; 7 – паровой ствол.

В паро- и пневмомеханических форсунках дробление топлива осуществляется путем одновременного воздействия на него механическим и паровым (пневматическим) завихрителями. Конструктивно такие форсунки изготавливают двухсопловыми (распыливающий агент взаимодействует с топливом на выходе последнего в топочное пространство (рис.1.8) и двухкамерными (потоки распыливающего агента и топлива взаимодействуют внутри форсунки) с одним выходным соплом.

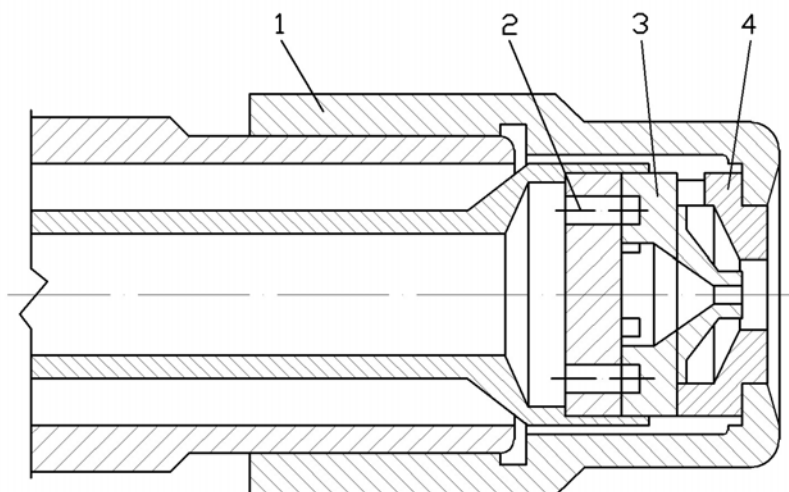


Рис. 1.8. Головка паромеханической форсунки горелки ГМГМ:

1 - накидная гайка; 2 - шайба распределительная; 3 - завихритель топливный; 4 - завихритель паровой.

В ротационных форсунках дробление и подача топлива в топку осуществляется при помощи вращающегося стакана (рис. 1.9). Топливо подается через полу трубу к насадку, из него на стенку стакана, где распределяется в виде пленки, пленка обрывается со среза стакана. Для дополнительного воздействия на пленку топлива к стакану подводится первичный воздух (10...20% от общего его количества, подаваемого на горение). Образовавшаяся богатая смесь капель топлива и воздуха поступает в топку. Более подробная классификация форсунок приведена в разделе 1.4.

Совершенство сжигания жидкого топлива зависит от качества его распыливания, которое характеризуется распределением капель по размерам, средним диаметром капель, углом раскрытия (конусности) и дальностью струи, плотностью орошения, т.е. количеством жидкости, проходящей в единицу времени через единицу площади живого сечения струи.

Фракционный состав капель в струе может быть записан как зависимость, имеющая вид нормального закона распределения Гаусса

$$n_K = N e^{-a^2 d^2 / d_1^2}, \quad (1.1)$$

где  $n_k$  - число капель, диаметр которых больше текущего диаметра  $d_i$ ;  $N$  - общее число капель при распылении заданной массы топлива;  $a$  – коэффициент распределения.

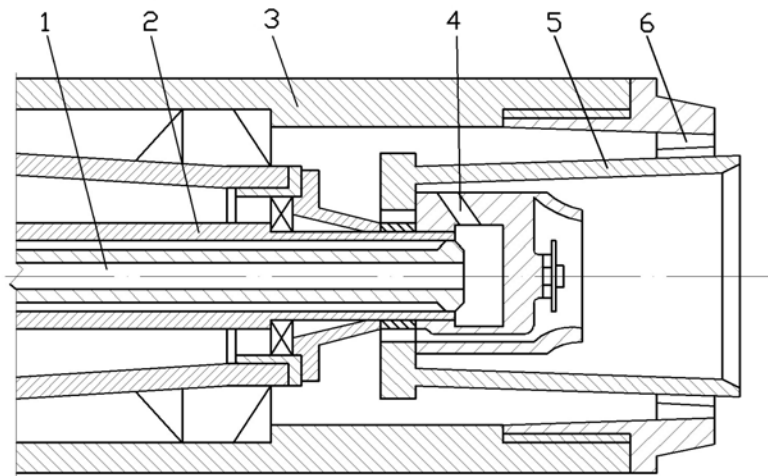


Рис. 1.9. Головка ротационной форсунки:

1- топливоподающая труба; 2- полый вращающийся вал; 3- корпус; 4- питатель; 5- вращающийся распыливающий стакан; 6- завихритель первичного воздуха.

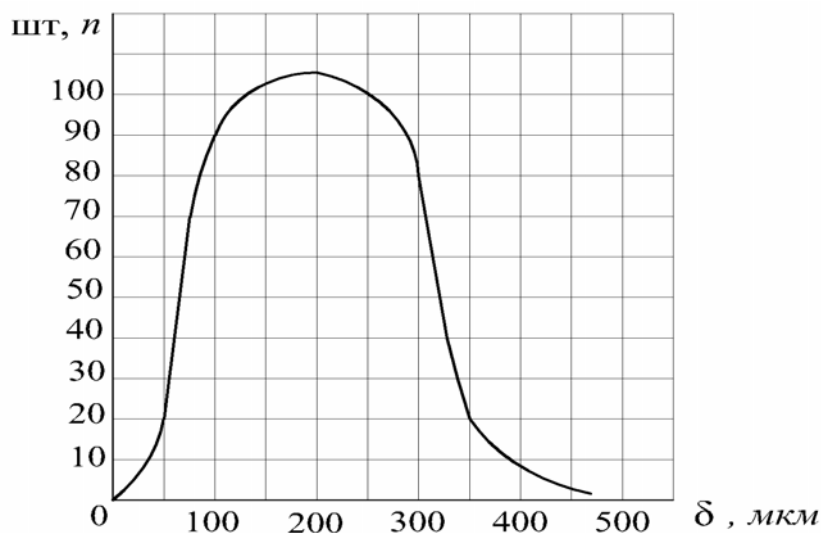


Рис. 1.10. Частотная кривая распределения капель в струе.

Графически выражение (1.1) представлено на рис. 1.10. Из рисунка видно, что распределение капель по размеру очень неравномерно, между максимальным и минимальным размерами находится наиболее вероятный размер капель, число которых максимально, с увеличением и уменьшением размера капель количество капель наиболее вероятного размера уменьшается.

Суммарная масса капель распыленной жидкости может быть определена

из выражения

$$M_k = \frac{1}{3} \pi \rho a^2 e^{a^2 d_{\max}^2} \int_0^{d_{\max}} d_i^4 e^{-a^2 d_i^2} dd_i, \quad (1.2)$$

где  $d_{\max}$  - максимальный диаметр капли,  $\rho$  - плотность жидкости.

На практике для оценки распыливания используется характеристика форсунки по максимальному диаметру капли, определенному по пробе из ста капель,  $d_{100}$ :

$$a^2 = \frac{\lg 100}{d_{100}^2 \ln e} \cong \frac{4,6}{d_{100}^2}. \quad (1.3)$$

С учетом этого суммарная масса капель

$$M_k = 4,8 \frac{e^{4,6 \frac{d_{\max}}{d_{100}}}}{d_{100}^2} \int_0^{d_{\max}} d_i^4 e^{-4,6 \frac{d_i^2}{d_{100}^2}} dd_i. \quad (1.4)$$

Это выражение дает однозначную связь между количеством распыленной жидкости и максимальным диаметром капли при известной характеристике форсунки. Например, если известно, что  $d_{100} = 630$  мкм, то массе распыленной жидкости 0,1 кг соответствует  $d_{\max} = 1150$  мкм. Зависимость (1.4) учитывается при анализе процессов распыления, при расчетах испарения и выгорания топлива в полидисперсном факеле.

Поверхность всех капель при распылении массы  $M_k$  жидкости

$$S_k = 0,68 d_{100}^2 e^{4,6 \left( \frac{d_{\max}}{d_{100}} \right)^2}. \quad (1.5)$$

При механическом распыливанием средний диаметр капель зависит от давления топлива

$$d_{cp} = \Delta p^{-k}. \quad (1.6)$$

Для форсунок с диаметром сопла  $d_c$  до 3 мм  $k = 0,3 \dots 0,37$ ; с  $d_c$  до 16 мм  $k$



= 0,14, т.е. с увеличением диаметра сопла влияние давления топлива на тонкость распыливания уменьшается (рис. 1.11).

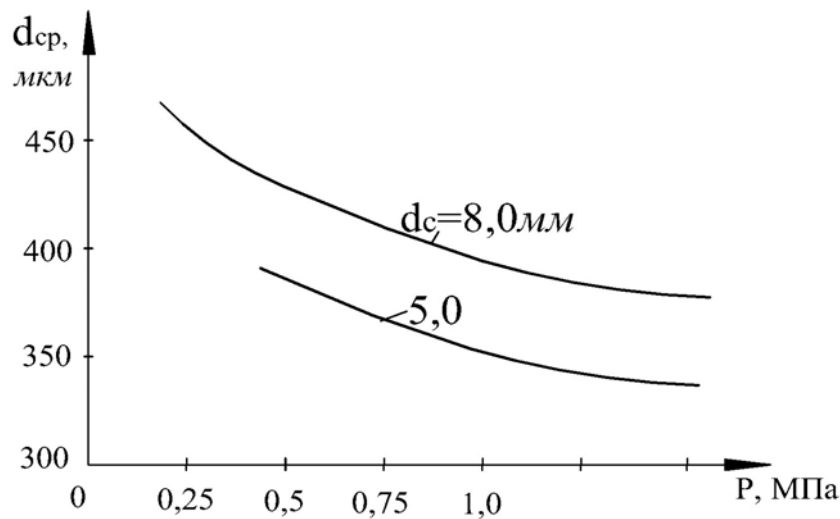


Рис. 1.11. Влияние давления топлива на диаметр капли в зависимости от диаметра распыливающего сопла

С увеличением вязкости топлива  $d_{ср}$  возрастает (рис. 1.12а). На рис. 1.12б приведен график перевода кинематической вязкости в условную.

Зависимость дисперсности распыливания от диаметра сопла форсунки (рис. 1.13) может быть определена из выражения

$$d_{ср} \cong d_c^n, \quad (1.7)$$

где  $n = 0,5...0,6$ .

Зависимость дисперсности распыливания от нагрузки форсунки представлена на рис. 1.14. Для паромеханических форсунок при отсутствии распыливающего агента и механических форсунок тонкость распыливания возрастает с ростом нагрузки. У паромеханических форсунок с распыливающим агентом и форсунок с обратным сливом с ростом нагрузки  $d_{ср}$  сначала возрастает (с максимумом в диапазоне 50...70% нагрузки), а затем вновь уменьшается.

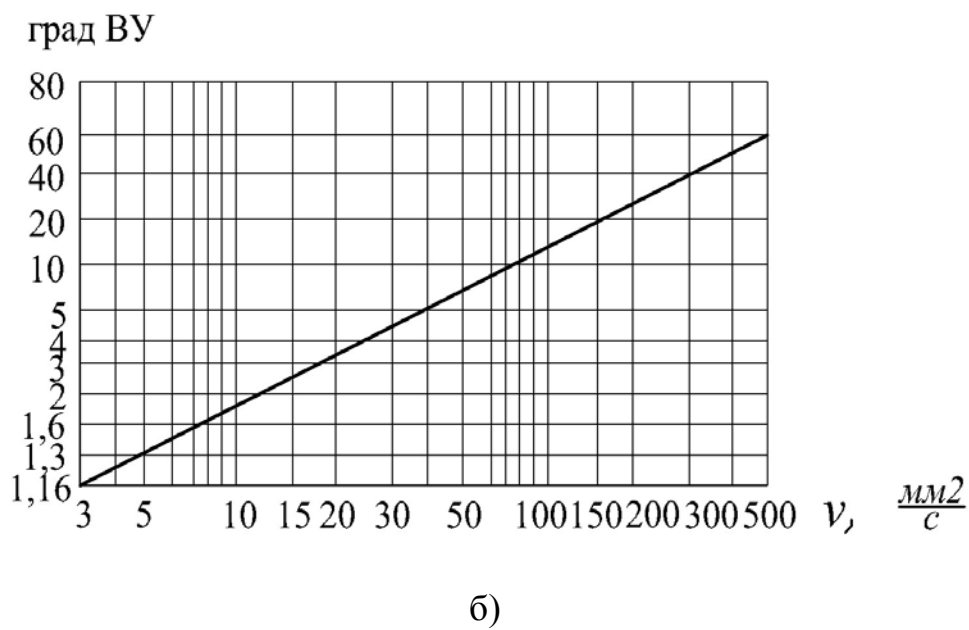
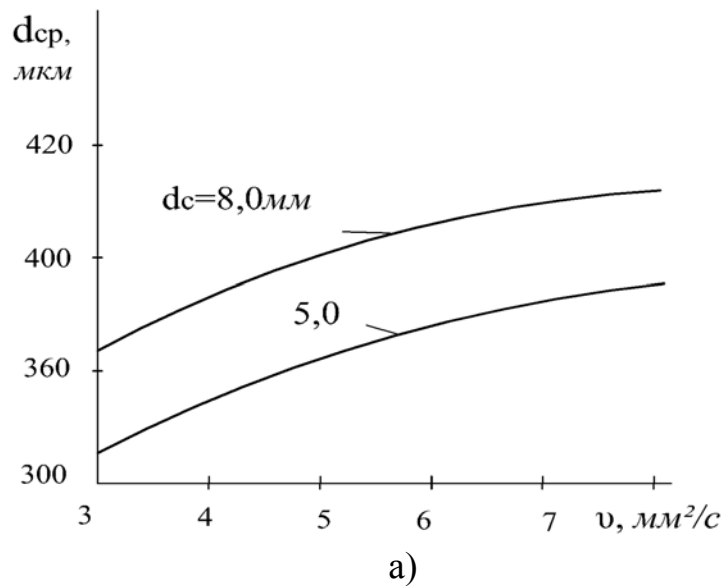


Рис. 1.12. Влияние характеристик топлива на диаметр капли:  
 а) зависимость диаметра капли от кинематической вязкости топлива и диаметра распыливающего сопла; б) номограмма перевода кинематической вязкости в градусы условной вязкости.

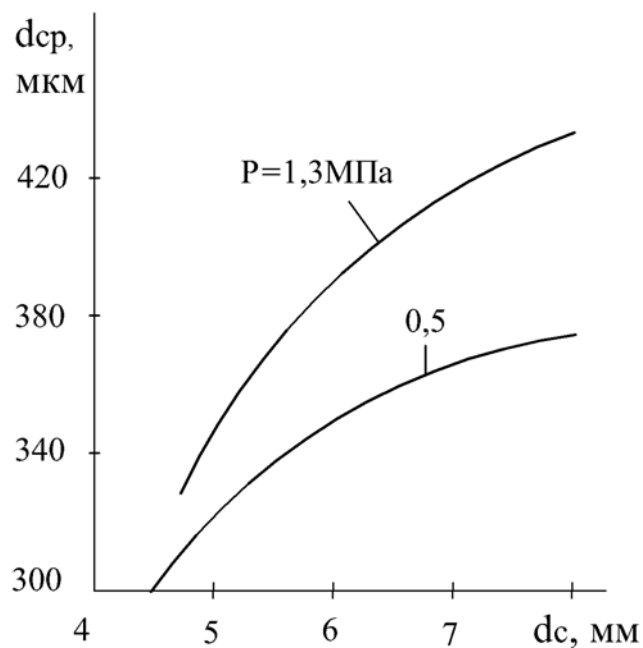


Рис. 1.13. Влияние диаметра распыливающего сопла и давления топлива на диаметр капли

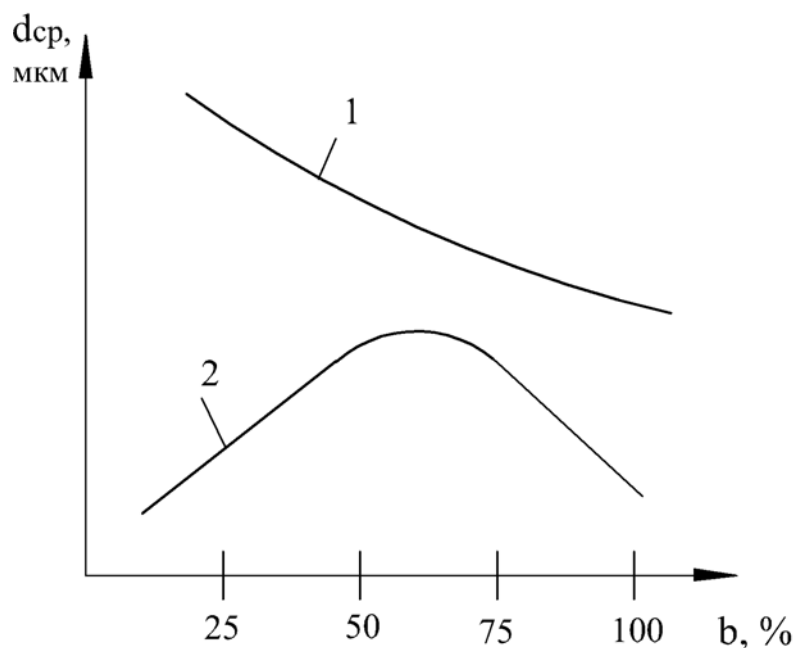


Рис. 1.14. Влияние нагрузки форсунки на диаметр капли:  
1 – без распыливающего агента; 2 – форсунка с обратным сливом или с распыливающим агентом

В паровых и пневматических форсунках дисперсность распыливания зависит от количества распыливающего агента, давление и скорость движения топлива не оказывают существенного влияния на качество распыливания, увеличение расхода распыливающего агента уменьшает диаметр капель до определенного значения, дальнейшее увеличение расхода не сказывается на дисперсности распыливания (рис. 1.15).

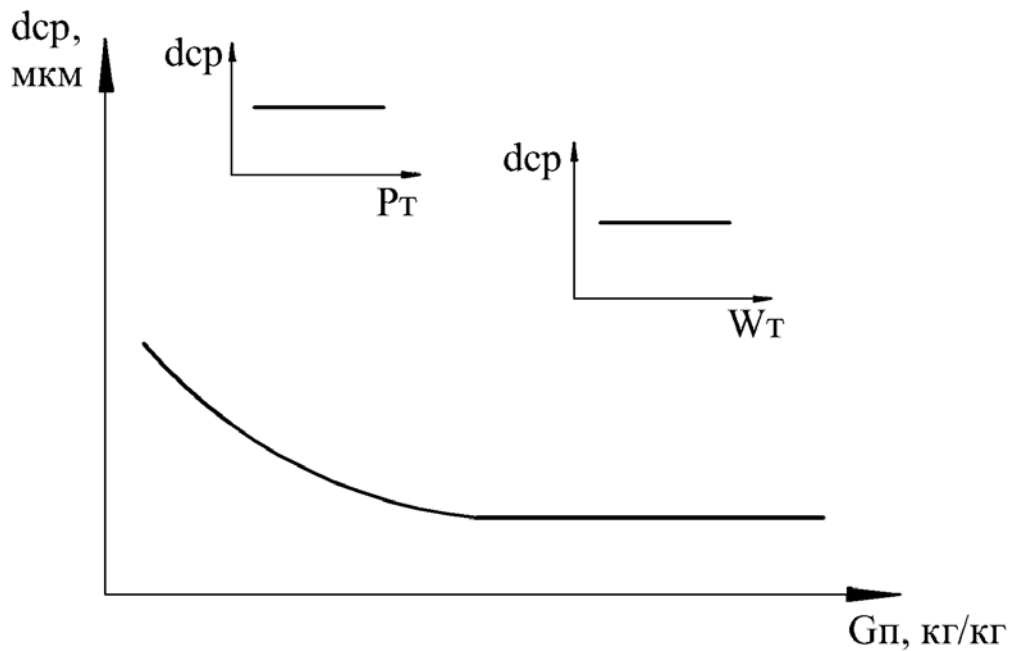


Рис. 1.15. Влияние расхода распыливающего агента на диаметр капель

Для оценки влияния распыливающего агента на качество распыливания используется удельная энергия распыливающего агента.

$$e_p = \frac{E_p}{G_T}, \quad (1.8)$$

где  $E_p$  - энергия распыливающего агента.

Для пневматических форсунок

$$E_p = \frac{G_p \bar{w}_B^2}{(2g)},$$

где  $\bar{w}_B$  - средняя скорость воздуха.

для паровых форсунок  $E_p = G_p(h_2 - h_1)$ ,

где  $h_2$  и  $h_1$  - энтальпия пара до и после сопла.

Качество распыливания топлива повышается с увеличением удельной энергии  $e_p$ , с понижением вязкости топлива и с увеличением диаметра топливной струи.

Для паро- и пневмомеханических форсунок качество распыливания зависит от расхода и энергии распыливающего агента и топлива. При малых расходах топлива его давление не влияет на диаметр капель, последний в этом случае

зависит только от удельной энергии распыливающего агента. С ростом расхода топлива его энергия начинает сказываться на качестве дробления, дисперсность распыливания становится зависимой от суммарной энергии топлива и распыливающего агента

$$e_{mp} = \frac{w_T^2}{2g} + \beta \frac{w_p^2 G_p}{2g G_T}, \quad (1.9)$$

где  $\beta$  - коэффициент использования энергии (отношение переданной топливу энергии к полной энергии распыливающего агента),  $w_T$  и  $w_p$  - скорости топлива и распыливающего агента; для двухсопловых форсунок  $\beta = 0,24$ , для двухкамерных –  $\beta = 0,33$ .

Характер зависимости диаметра капли от суммарной энергии показан на рис.1.16, а от давления топлива  $p_T$  при  $p_p = \text{const}$  - на рис. 1.17.

В последнем случае увеличение диаметра капли происходит до тех пор, пока энергия давления топлива не станет соизмеримой с энергией распыливающего агента. Уменьшение диаметра капель топлива приводит к увеличению поверхности реагирования и к интенсификации сжигания с одновременным повышением экономичности горения (снижение  $q_3$  и  $q_4$ ).

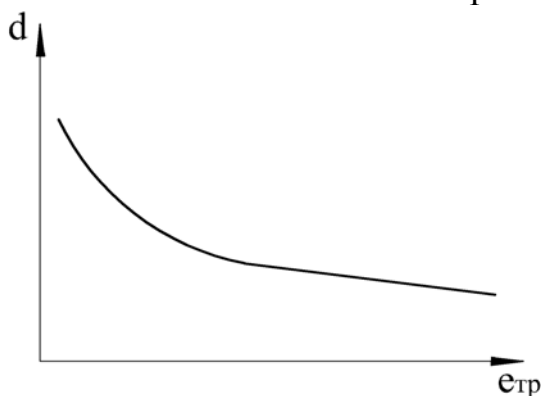


Рис. 1.16. Влияние суммарной энергии топлива и распыливающего агента на диаметр капли.

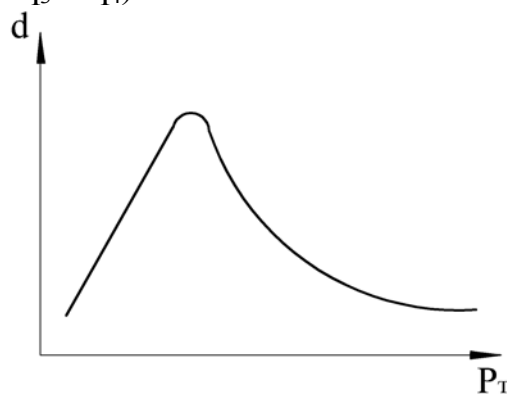


Рис. 1.17. Влияние давления топлива при постоянном давлении распыливающего агента на диаметр капли.

Скорость сгорания распыленного топлива зависит также от однородности распыливания. Практически не удастся получить все капли в факеле одинакового размера и к этому не следует стремиться. Неоднородность распыливания является полезной, т.к. разного размера капли имеют различное количество движения, что способствует более благоприятному распределению топлива по ширине и глубине факела и более стабильному горению при различных режимах работы топki, т.к. капли различных размеров проникают в горящий факел под разными углами на разную глубину. Конечно, такой подход справедлив при условии ограничения максимального размера капель: самые большие капли не должны выпадать из потока окислителя.

Характеристикой распределения топлива по диаметру факела служит угол раскрытия факела форсунки. Так, угол раскрытия факела центробежно-механической форсунки при вязкости топлива  $\sim 3^\circ \text{ВУ}$  выражается

$$\beta_\phi = k_\beta \sqrt[3]{A}, \quad (1.10)$$

где  $\beta_\phi$  - угол раскрытия факела форсунки, в градусах,  $A = \frac{d_c^{1,2} d_{кз}^{0,3}}{m f_{кз}}$  - упрощен-

ная геометрическая характеристика форсунки,  $d_{кз}$  - диаметр камеры завихрения форсунки,  $f_{кз}$  - площадь тангенциального канала камеры завихрения,  $m$  - число тангенциальных каналов (см.рис.1.6, 1.8),  $k_\beta$  - коэффициент, зависящий от качества обработки распыливающих элементов,  $k_\beta = 0,66...0,71$ .

В реальных условиях угол  $\beta_\phi$  несколько меньше рассчитанного (по 1.10) вследствие поджатия факела воздушным потоком, набегающим на конус распыленного топлива. Изменение угла  $\Delta\beta_\phi$  может быть оценено по зависимости, представленной на рис. 1.18.

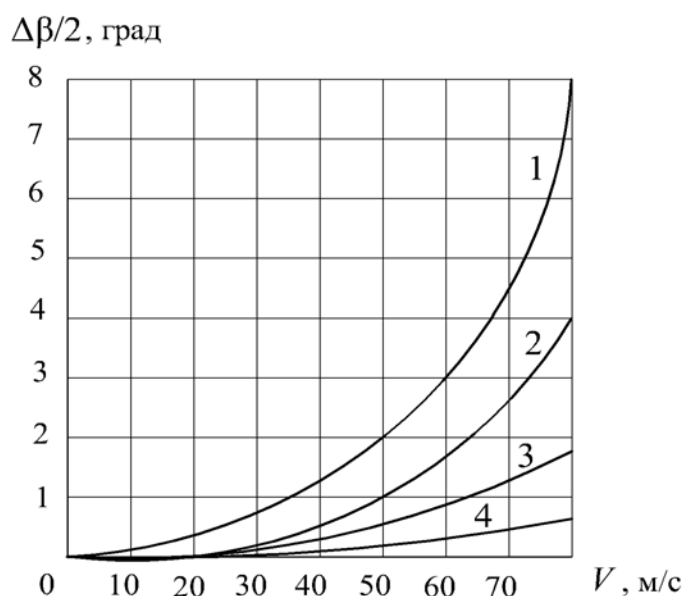


Рис. 1.18. Влияние скорости воздушного потока на угол раскрытия мазутного факела. Максимальный диаметр капель мазута  $\delta_{\max}$ : 1 – 120 мкм; 2 – 240 мкм; 3 – 400 мкм; 4 – 800 мкм

Дальность полета капли  $x$  (дальнобойность факела) зависит от диаметра капли

$$x = \frac{2d_k^{1,5} k w_T \phi}{2d_k^{1,5} + Y_k k^{0,5} \bar{w}_T^{0,5} \phi}, \quad (1.11)$$

где  $k$  - коэффициент, учитывающий отклонение скорости капль от средней скорости  $\bar{w}_T$  истечения топлива,

$$k = 0,16 + 0,84 \exp(-8d_k); \quad Y_k = \frac{3}{4} \frac{k_\phi v^{0,5} c}{c_T};$$

$k_\phi$  - коэффициент формы тела,  $v$  - кинематическая вязкость среды;  $\rho$  и  $\rho_T$  - плотности среды и топлива.

Если принять, что движение капельного факела заканчивается при  $\tau = \infty$ , то для каждой капли можно подсчитать ее максимальное удаление от сопла форсунки (рис. 1.19). Длина горящего факела будет отличаться от дальнотойности, рассчитанной по (1.11).

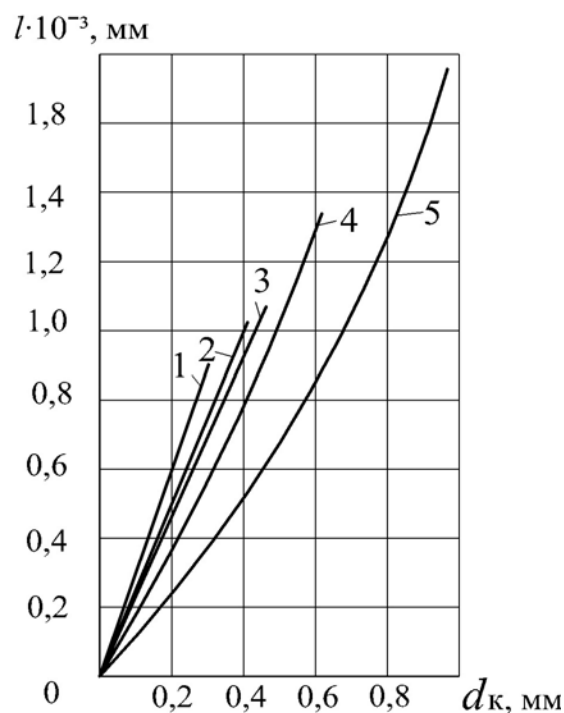


Рис. 1.19. Влияние диаметра капли  $d_k$  и её начальной скорости  $v$  м/с, на дальность полета капли:  
1 -  $v = 100$ ; 2 -  $v = 80$ ; 3 -  $v = 60$ ; 4 -  $v = 40$ ; 5 -  $v = 20$ .

Для качественной организации сжигания необходимо обеспечить получение достаточно однородной смеси капль топлива и окислителя. Равномерное распределение топлива в потоке воздуха зависит от формы и дисперсности мазутного факела, плотности распределения капль мазута в его сечении, от аэро-

динамического характера потоков воздуха и капель топлива. Первичное перемешивание топлива и воздуха (перед загоранием смеси) осуществляется с помощью горелки. Горелки бывают с круткой и без крутки воздуха. Существуют пять основных типов горелок с круткой воздуха в зависимости от организации движения воздушного потока (рис. 1.20).

*Горелка типа Т* с тангенциальным поводом воздуха (рис. 1.20,а). К цилиндрическому корпусу горелки тангенциально подведен патрубок подачи воздуха. В центре горелки расположена труба для установки форсунки. Закрученный поток воздуха направляется к устью горелки (к головке форсунки) и перемешивается с распыленным топливом, смесь подается в виде факела в топку.

*Горелка типа У* с улиточным подводом воздуха (рис. 1.20,б). Эта горелка обладает более интенсивной круткой, чем горелка Т. Форсунка устанавливается в центре горелки.

*Горелка типа ТЛ* с тангенциально-лопаточным подводом воздуха (рис. 1.20,в). Внутри корпуса по касательной к образующей проточной части горелки установлены лопатки, закручивающие поток воздуха, поступающий в общий короб горелки. Спиралеобразный вихрь воздуха поступает к головке форсунки, установленной в центре горелки, где смешивается с распыленным топливом.

*Горелка типа А* с аксиальной круткой воздуха (рис. 1.20,г). Воздухозакручивающий аппарат состоит из радиальных перекрывающих друг друга и установленных под углом к оси горелки лопаток, расположенных между корпусом горелки и центральной трубой, в которой устанавливается форсунка. Интенсивность крутки воздуха зависит от угла установки лопаток.

*Горелка типа АТ* с аксиально-лопаточным завихрителем (рис. 1.20,д). Завихрывающие лопатки расположены под углом к касательной к окружности, лежащей в плоскости, нормальной к оси горелки, и наклонены к оси горелки, т.е. образуют углы с осью горелки в двух плоскостях.

Закрутка воздуха обеспечивает высокую начальную турбулизацию в зоне смешения, сокращающую время подготовки топливовоздушной смеси. Показатель закрутки характеризуется коэффициентом интенсивности крутки  $n$  [2,4]. Известны выражения для вычисления коэффициентов крутки:

- для горелки типа Т (рис. 1.21а):

$$n = d \frac{d - a}{ab},$$

где  $ab$  - площадь входного сечения подвода воздуха;

- для горелки типа У (рис. 1.21б):

$$n = \frac{d(d + a + 2c)}{ab},$$

- для горелки типа ТЛ (рис. 1.21в)



$$n = \frac{d^2 \cos \alpha \cos \beta}{Lm\varepsilon},$$

где  $\alpha$  - угол между плоскостью лопаток и осью горелки;  $\beta$  - угол наклона лопаток к оси горелки в случае выполнения их в форме параллелограмма;  $L$  - длина лопаток вдоль оси горелки;  $m$  - число лопаток;  $\varepsilon$  - кратчайшее расстояние между двумя соседними лопатками;

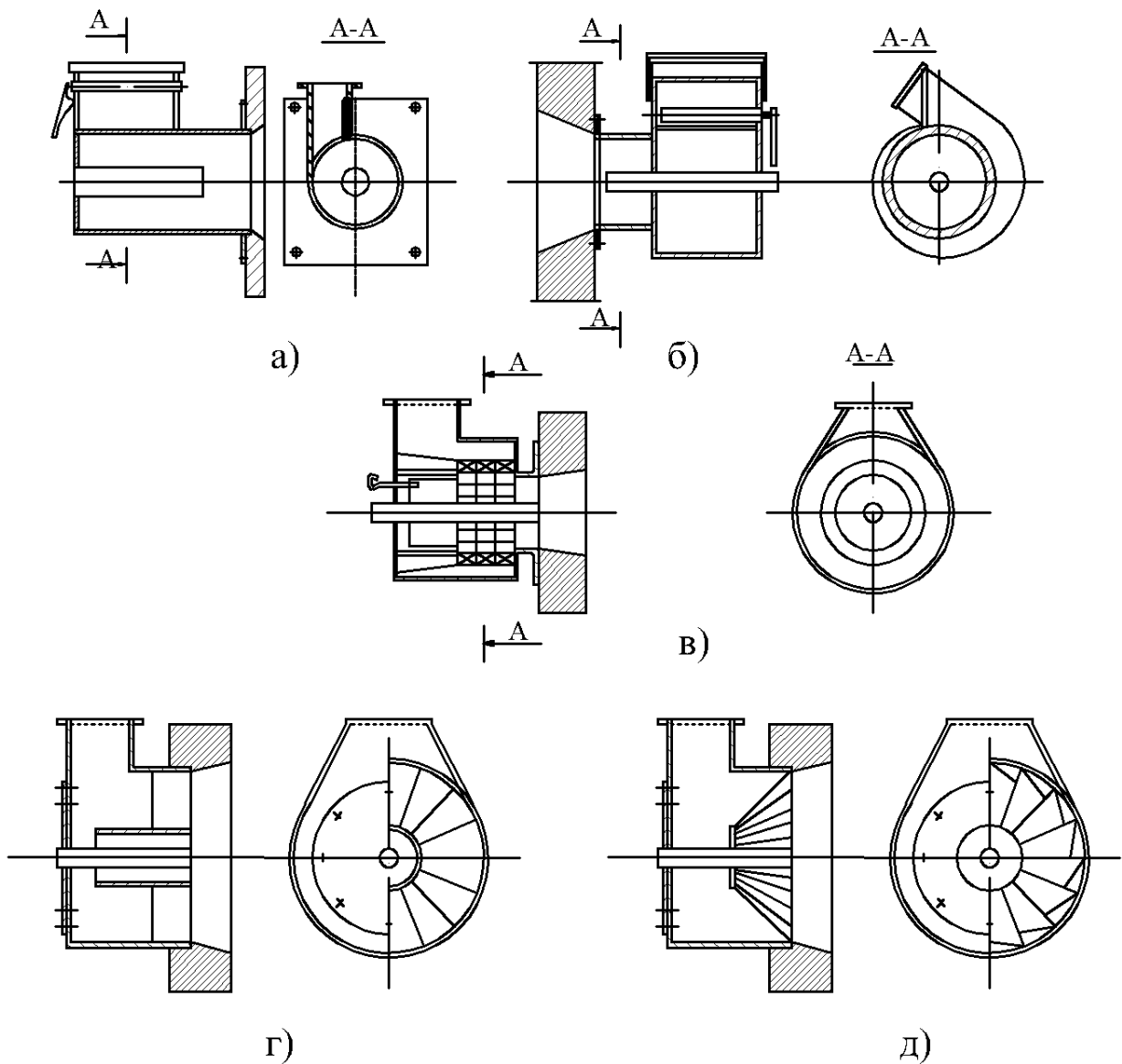


Рис. 1.20. Типы горелок с круткой воздуха:  
а) - тип Т; б) - тип У; в) - тип ТЛ; г) - тип А; д) - тип АТ.

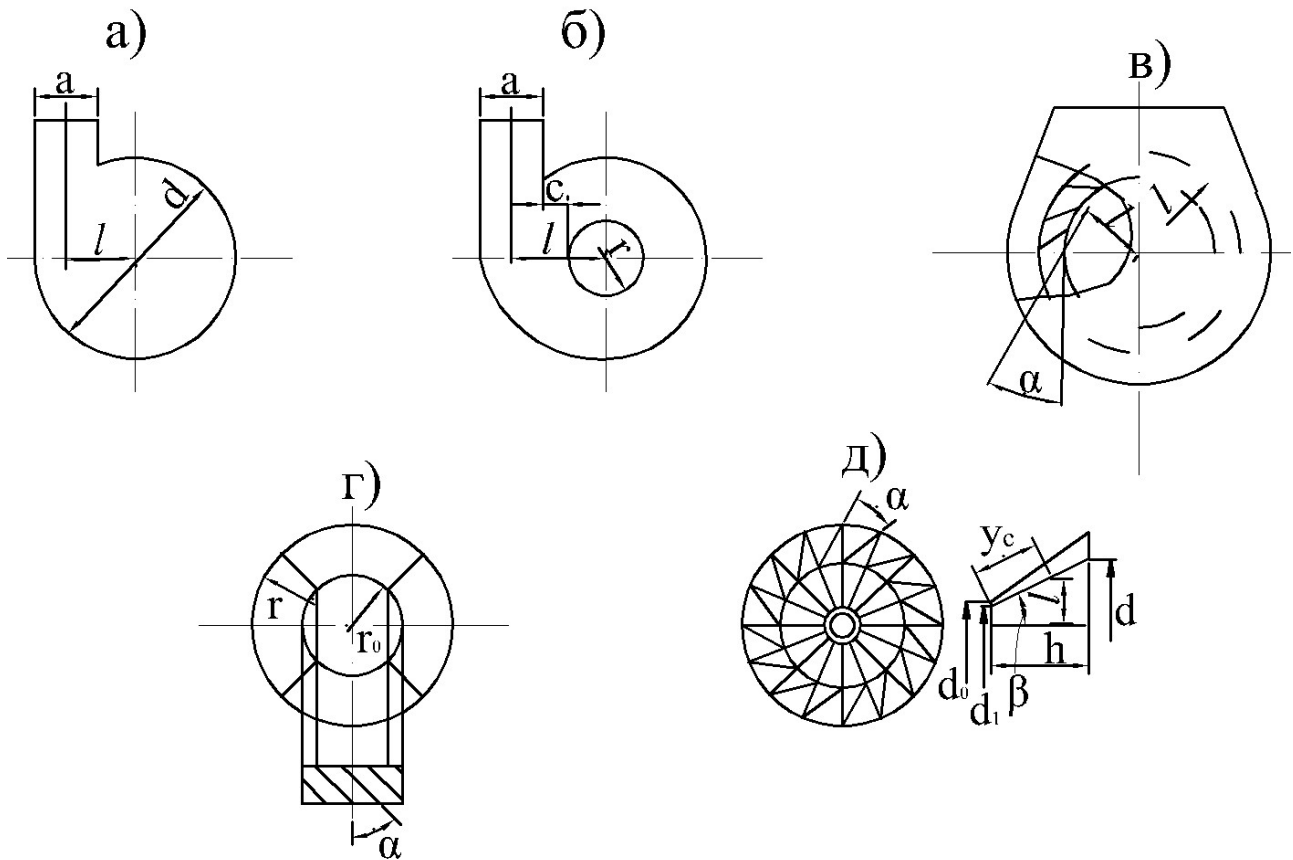


Рис. 1.21. Определяющие размеры горелок с круткой воздуха:  
а) - тип Г; б) - тип У; в) - тип ТЛ; г) - тип А; д) - тип АТ.

- для горелок типа А (рис.1.21 г)

$$n = \frac{3d}{3p} \cdot \frac{d^3 - d_0^3}{d^2 - d_0^2} \operatorname{tg} \alpha;$$

- для горелок типа АТ (рис. 1.21д)

$$n = \frac{8d}{3p} \cdot \frac{d^3 - d_0^3}{(d^2 - d_0^2)^2} \cdot \frac{\cos \alpha \cdot \sin \alpha}{\sin\left(\alpha + \frac{p}{m}\right)},$$

где  $\alpha$  - угол в плоскости, нормальной к оси завихрителя, между лопатками и касательной к окружности, проходящей через выходную кромку лопаток;  $d_1$  - диаметр окружности, описывающей выходные кромки переднего по ходу воздуха торца завихрителя.

По известному значению  $n$  для различных типов горелок можно вычис-

лить аэродинамический угол раскрытия факела, дальность струи и диаметр зоны отрицательных токов [4] .

## 1.2. Горение единичной капли

Горение факела распыленного жидкого топлива определяется в основном горением отдельных капель. Горение капли происходит только в газовой фазе. Горению предшествует прогрев капли и испарение топлива, смешение паров топлива с окислителем, прогрев горючей смеси до температуры воспламенения и собственно горение смеси. Установившееся горение характеризуется двумя взаимосвязанными процессами: испарением горючего за счет теплоты, получаемой от пламени, и горением смеси воздуха и паров топлива на некотором расстоянии от поверхности капли; при этом скорость испарения и скорость горения смеси одинаковы. Иначе, скорость горения жидкой капли понимается как скорость исчезновения жидкой фазы или как скорость испарения.

На процесс испарения капли влияют различные факторы: свойства топлива, температура газа, окружающего каплю, диаметр (радиус) капли. Мазут представляет собой смесь многих фракций; при нагревании капли вначале испаряются легкие фракции, в уменьшающейся капле остаются фракции более тяжелые, поэтому температура капли в процессе кипения возрастает. Однако, если испарение капли происходит очень быстро, диффузионные процессы выравнивания состава внутри капли практически отсутствуют, и можно считать, что испаряется жидкость одного, среднего состава, а температура капли в процессе испарения остается постоянной, равной температуре кипения. При этом считается, что теплообмен между пламенем и каплей осуществляется за счет конвекции (лучистая составляющая теплообмена не учитывается).

Если в рассматриваемый момент времени радиус капли равен  $r_k$ , то количество теплоты, подведенной к капле за время  $dt$ , равно

$$dQ = 4\pi r_k^2 \alpha (t - t_k) dt \quad (1.12)$$

где  $4\pi r_k^2$  - площадь медианного сечения капли,  $\alpha$  - коэффициент теплоотдачи от газовой среды к капле,  $t$  - температура газовой среды,  $t_k$  - температура поверхности капли.

При уменьшении радиуса капли на  $dr_k$  количество испарившегося топлива составит

$$dG_T = -4\pi r_k^2 \rho_k dr_k \quad (1.13)$$

где  $\rho_k$  - плотность жидкого топлива.

Иначе количество испарившегося топлива можно определить из выражения

$$dG_T = \frac{dQ}{q_{\text{исп}}}, \quad (1.13a)$$

где  $q_{\text{исп}}$  - испарения жидкого топлива, или, с учетом (1.12)

$$dG_T = \frac{4\pi r_k^2 \bar{\alpha} (t - t_k) dr_k}{q_{\text{исп}}}, \quad (1.13б)$$

Приравнивая (1.13) и (1.13б), получим

$$-\rho_k dr_k = \frac{\bar{\alpha} (t - t_k) dr_k}{q_{\text{исп}}}, \quad (1.14)$$

откуда

$$dr = -\frac{q_{\text{исп}} \rho_k dr_k}{\bar{\alpha} (t - t_k)}. \quad (1.15)$$

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  определяется экспериментально. В условиях конвективного теплообмена  $\alpha$  может быть найден из критерия Нуссельта  $Nu = \frac{\bar{\alpha} d}{\lambda}$ . Известно, что для мелких капель при  $Re < 100$  критерий  $Nu = 2$ , тогда

$\bar{\alpha} = \frac{2\lambda}{d_k} = \frac{\lambda}{r_k}$ , где  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности газовой смеси, окружаю-

щей каплю. Подставив найденное  $\alpha$  в (1.15), получим

$$dr = -\frac{q_{\text{исп}} \rho_k r_k dr_k}{\lambda (t - t_k)}. \quad (1.16)$$

За время горения капли  $\tau$  испаряется вся капля, радиус ее изменяется от  $r_{\text{к0}}$  до 0, т.е.

$$\int_0^{\phi} dr_k = \frac{- \int_{r_{ko}}^0 q_{исп} c_k r_k dr_k}{\ln(t - t_k)} = \frac{\int_0^{r_{ko}} q_{исп} c_k r_k dr_k}{\ln(t - t_k)}. \quad (1.17)$$

Учитывая, что, в соответствии с приведенными выше упрощениями, все величины в (1.17), кроме  $r_k$ , остаются в процессе испарения постоянными, получаем после интегрирования

$$\phi = k_{исп} r_{ko}^2. \quad (1.18)$$

Эта зависимость была впервые получена Б.И.Срезневским и называется законом Срезневского.

В выражении (1.18)  $k_{исп} = \frac{q_{исп} c_k}{\ln(t - t_k)}$  называют *константой испарения*.

Численные значения константы испарения капель некоторых топлив приведены в табл. 1.3.

Таблица 1.3

### Константа испарения при различных температурах

Топливо	Константа испарения $k_{исп}$ , с/мм <sup>2</sup> при температуре, °С				
	1000	1200	1400	1600	1800
Дизельное топливо	0,35	0,30	0,25	0,22	0,19
Сланцевое масло	0,40	0,35	0,30	0,25	0,22
Мазут 40	0,50	0,40	0,35	0,30	0,25
Мазут 100	1,00	0,80	0,70	0,60	0,50

В настоящее время существует два подхода к описанию горения единичной капли топлива: с использованием диффузионной теории горения и по диффузионной теории горения с учетом кинетических факторов. Различие этих двух подходов к анализу горения капли заключается в следующем. Диффузионная теория предполагает, что время выгорания капли и характеристики процесса определяются диффузионным переносом паров топлива и кислорода к месту горения. При втором подходе дополнительно учитывается кинетическое сопротивление горению. При малых диаметрах капель и малых числах Рейнольдса (относительная скорость потока газов и капель в этом потоке мала) горение капли описывается чисто диффузионной теорией. Экспериментально установлено, что скорость испарения капли, подсчитанная по диффузионной тео-

рии, удовлетворительно совпадает с опытными данными, температура в зоне горения оказывается меньше расчетной, а зона горения расположена ближе к поверхности по сравнению с расчётными данными.

Диффузионная теория горения была разработана Г.А.Варшавским в 1964г. В ней принята схема приведенной пленки. Под приведенной пленкой понимается такая концентрическая шаровая пленка вокруг горячей капли, через которую посредством теплопроводности проходит столько же теплоты, сколько к ней поступает за счет конвекции. Как уже говорилось, зона горения отстоит на некотором расстоянии от капли, толщина зоны горения весьма мала (доли миллиметра). В первом приближении можно считать, что зона горения совпадает с поверхностью приведенной пленки, температура в этой зоне равна  $t_T$ , а температура капли равна температуре ее кипения. Теплота, выделившаяся при сгорании испарившейся части  $\Delta G_T$  капли равна  $\Delta G_T q_T$ , где  $q_T$  - теплота сгорания жидкого топлива при температуре капли. Она отводится от приведенной пленки в окружающую среду и к капле. Теплота испарения топлива  $Q_{исп}$  и перегрева паров  $Q_{пер}$  до температуры, при которой произойдет их воспламенение, возвращается из зоны горения к капле и вновь расходуется на испарение и перегрев пара. Итак, в квазистационарном режиме приходная часть теплоты горения

$$Q_T = \Delta G_T q_T + Q_{исп} + Q_{пер}. \quad (a)$$

Расходуется эта теплота на теплоотдачу в окружающую среду и к капле  $Q_{вн}$

$$Q_{рн} = Q_{нар} + Q_{вн}, \quad (б)$$

где, как было сказано

$$Q_{нар} = Q_{исп} + Q_{пер}, \quad (в)$$

Подставив (б) и (в) в (а), получим

$$Q_{нар} = \Delta G_T q_T.$$

При малом кинетическом сопротивлении процессу горения не могут одновременно существовать и пары топлива, и окислитель, поэтому на поверхности горения концентрации окислителя и горючего равны нулю, т.е. горение происходит стехиометрически,  $\alpha = 1$ .

На рис. 1.22 приведена схема, поясняющая диффузионное горение капли.

Пары топлива с поверхности капли переносятся за счет диффузии к зоне горения, как и кислород к поверхности горения из окружающей среды. Во внутренней части приведенной пленки (между поверхностью горения и каплей) находятся только продукты сгорания и пары топлива. В процессе горения изменяются диаметр капли и диаметр сферы поверхности горения. Для расчета процесса горения составляются четыре балансовых уравнения.

Для внутренней зоны (между каплей и зоной горения) уравнение теплового баланса

$$DG_T [q_{исп} + c_{п}(t_o - t_k)] = \frac{4\pi r^2 \rho_{п} dt_i}{dr}, \quad (1.19)$$

где  $c_{п}$  - концентрация паров топлива;  $r$  - текущий радиус от нуля до радиуса сферы поверхности горения; левая часть уравнения - расход теплоты на испарение и перегрев паров топлива от температуры капли  $t_o$  до температуры  $t_k$  в зоне горения, тогда  $t_i$  - текущая температура и материального баланса

$$DG_T = -4\pi r^2 \left( \frac{Dc_{п} dz_{п}}{dr} - wc_{п} z_{п} \right), \quad (1.20)$$

где  $D$  - коэффициент диффузии,  $\rho_{п}$  и  $z_{п}$  - плотность паров и относительное содержание пара в смеси "пар-продукты сгорания",  $w$  - скорость паров топлива. Здесь в правой части первый член определяет перенос пара за счет молекулярной диффузии, второй соответствует конвективному (стефановскому) потоку пара от капли к зоне горения.

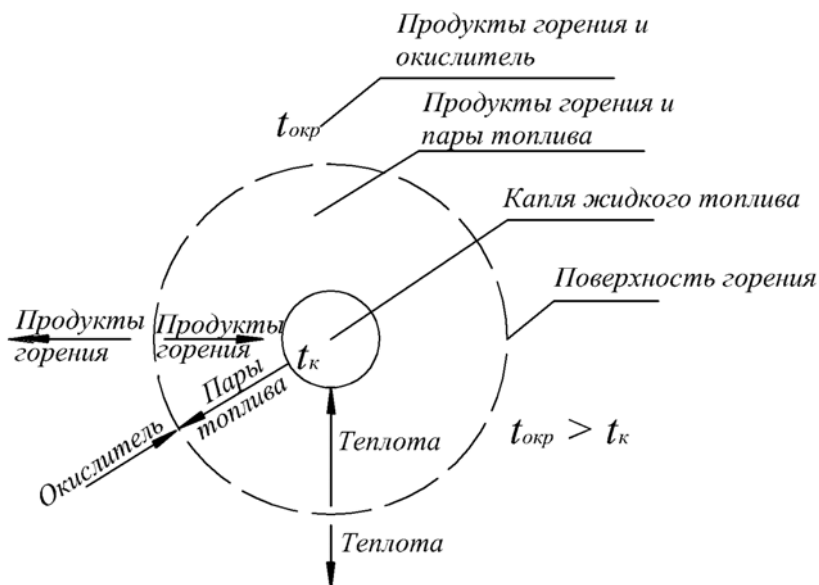


Рис. 1.22. Схема горения капли

Для внешней зоны (между зоной горения и окружающей средой) уравнение теплового баланса имеет вид

$$DG_T [q_T - c_{\text{п}}(t_k - t)] = \frac{-4\pi r^2 \lambda dt}{dr}. \quad (1.21)$$

Здесь второй член в левой части соответствует доле теплоты сгорания, которая выносится со стефановским потоком; и материального баланса (по кислороду)

$$DG_T (z_{\text{O}_2}^T + z_{\text{O}_2}^{\text{CM}}) = \frac{4\pi r^2 D \rho_{\text{O}_2} dz_{\text{O}_2}^{\text{CM}}}{dr}, \quad (1.22)$$

где  $z_{\text{O}_2}^T$  - отношение расхода кислорода к расходу топлива;  $z_{\text{O}_2}^{\text{CM}}$  - относительное содержание кислорода в смеси "окислитель - продукты сгорания". Второй член в левой части соответствует конвективному переносу.

Совместное решение уравнений (1.19)...(1.22) позволяет определить скорость испарения, температуру в зоне горения, диаметр сферы поверхности горения и температуру поверхности капли.

Учет кинетического сопротивления горения позволяет дополнительно определить распределение температур и концентраций около капли [3]; на рис. 1.23 показаны графики изменения концентраций топлива и окислителя, а также изменение температуры при горении капли.

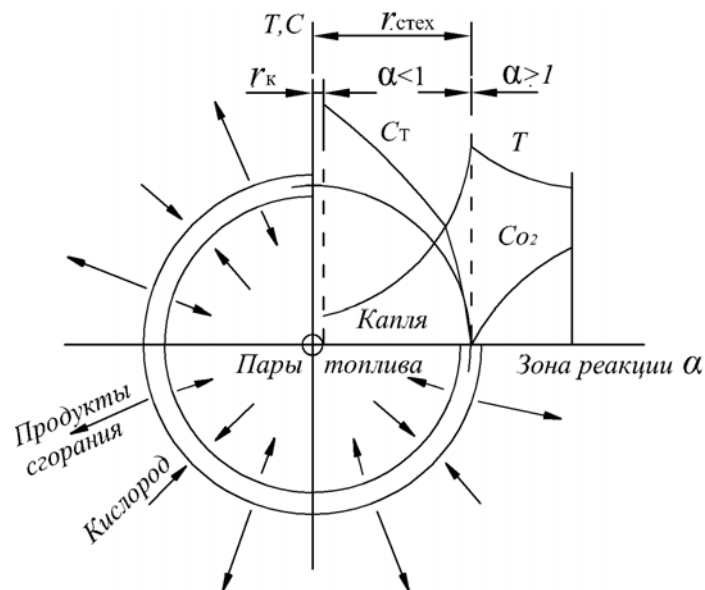


Рис. 1.23. Изменение концентраций и температур в зоне горения капли:  
 $C_T$  - концентрация топлива;  $C_{\text{O}_2}$  - концентрация кислорода;  $T$  - температура.



### 1.3. Горение жидкого топлива в факеле

Топливоздушная смесь поступает в топку в виде прямооточных или закрученных струй. Для воспламенения распыленного жидкого топлива необходимо испарить некоторую его часть и подогреть смесь паров топлива с окислителем до температуры горения. В начальный период (при розжиге горелки) теплота подводится от специального газового запальника (при отсутствии газового топлива - от автономных источников теплоты). Запальник отключается после достижения стабильного процесса горения. В дальнейшем воспламенение вновь поступающих порций топлива и устойчивое их горение происходит за счет двух источников теплоты: теплового излучения из ядра факела и от стен топочной камеры и, в большей степени, конвективного нагрева при перемешивании свежей топливоздушной смеси с горячими топочными газами.

Прямоточная струя имеет небольшой угол раскрытия и вялое перемешивание капель топлива с потоком воздуха. Образовавшаяся топливоздушная смесь нагревается высокотемпературными продуктами сгорания, рециркулирующими от наружной образующей горящего факела к устью горелки. Воспламенение в мазутном прямооточном факеле происходит с внешней границы струи свежей топливоздушной смеси и распространяется вглубь струи.

Закрученная струя имеет большой угол раскрытия и большую интенсивность перемешивания капель топлива с окислителем, а также большую эжектирующую способность. Рециркуляция раскаленных продуктов горения к свежей топливоздушной смеси (к корню факела) происходит как с наружной образующей горящего факела, так и внутри факела, в зоне обратных токов [2]. Воспламенение в закрученном факеле происходит одновременно с наружной и с внутренней границ струи.

Воспламенившаяся часть смеси паров топлива с воздухом, называемая фронтом пламени, зажигает прилегающие слои смеси - фронт пламени перемещается. Такое перемещение характерно для смеси, находящейся в покое. Линейная скорость перемещения элемента фронта пламени относительно неподвижной смеси по нормали к поверхности фронта называется скоростью нормального распространения пламени  $U_n$ . Она может быть медленной (до 10 м/с) и быстрой (взрыв) - до 3000 м/с. Для гомогенной смеси углеводородов с воздухом  $U_n = 0,3...1,2$  м/с, для гетерогенных взвесей  $U_n = 0,3...0,7$  м/с. Скорость распространения пламени увеличивается с ростом давления и температуры смеси. Разбавление смеси инертным газом снижает  $U_n$ . Например, в смеси метана с кислородом  $U_n^{\max} = 3,25$  м/с, а в смеси метана с воздухом  $U_n^{\max} = 0,37$  м/с. В целом можно сказать, что скорость распространения пламени не зависит от гидродинамических условий, а зависит только от физико-химических свойств горючей смеси, т.е.  $U_n$  является физико-химической константой.

Для обеспечения стабильного положения в топочном пространстве зоны воспламенения, т.е. фронта горения факела, смесь к зоне воспламенения должна поступать со скоростью, равной скорости распространения пламени.

На рис. 1.24 стабильному положению фронта пламени соответствует точка пересечения кривых  $U_n$  и  $W_x$ . На оси абсцисс откладывается расстояние от

среза форсунки  $x_0$ , на этой же оси может быть показано время движения смеси (для  $x_0$  время  $\tau_0 = 0$ ). Тогда  $x_\phi$  - расстояние от среза форсунки, на котором находился фронт пламени, а  $\tau_{\text{инд}}$  - время подготовки топливовоздушной смеси до ее устойчивого горения, т.е. время индукции. Таким образом, факел в топочном пространстве имеет три области: негорящая часть факела, фронт пламени, горящая и догорающая часть факела.

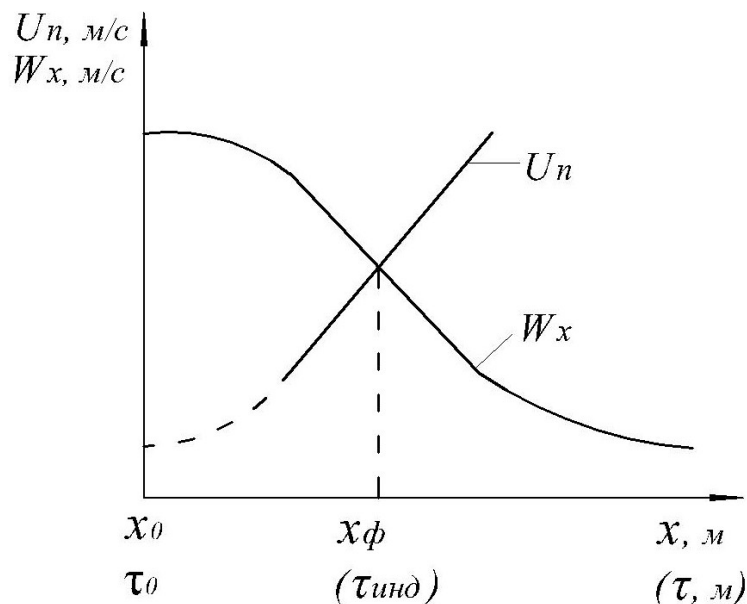


Рис. 1.24. Условие стабильного положения фронта воспламенения

На рис. 1.25 показана структура развития диффузионного факела [4]. Условно факел можно разделить на зоны. В зоне I осуществляется подвод турбулизированного потока воздуха к распыленному потоку мазута. В зоне II происходит активное перемешивание капель топлива с воздухом, подогрев основной массы капель топлива до температуры испарения, частичное испарение наиболее мелких капель. Именно в этой зоне происходит распределение топлива по сечению факела; границей зоны II является та часть факела, где прекращается действие сил инерции капель топлива, определяемых их массой и той скоростью, которую они имели на выходе из форсунки. Дальнейшее движение капель происходит вследствие воздействия на них движущегося потока смеси газов и воздуха. В зоне III полностью испаряются мелкие капли топлива, частично - более крупные; смесь паров топлива и окислителя воспламеняется и сгорает в кинетической области. При этом практически мгновенно выделяется до 50...70% тепловой энергии топлива.

Протяженность области кинетического горения определяется тонкостью распыливания и равномерностью распределения капель по сечению факела. Количество выделяющейся теплоты и развивающаяся при этом температура определяют скорость испарения и время подогрева топливовоздушной смеси до воспламенения в зонах II, III и последующих. В зоне IV происходит окончательное испарение всех капель и одновременное горение паров топлива, при-

чем пары горят вокруг каждой отдельной капли (см. механизм горения одиночной капли). Горение в этой зоне переходит в диффузионную область.

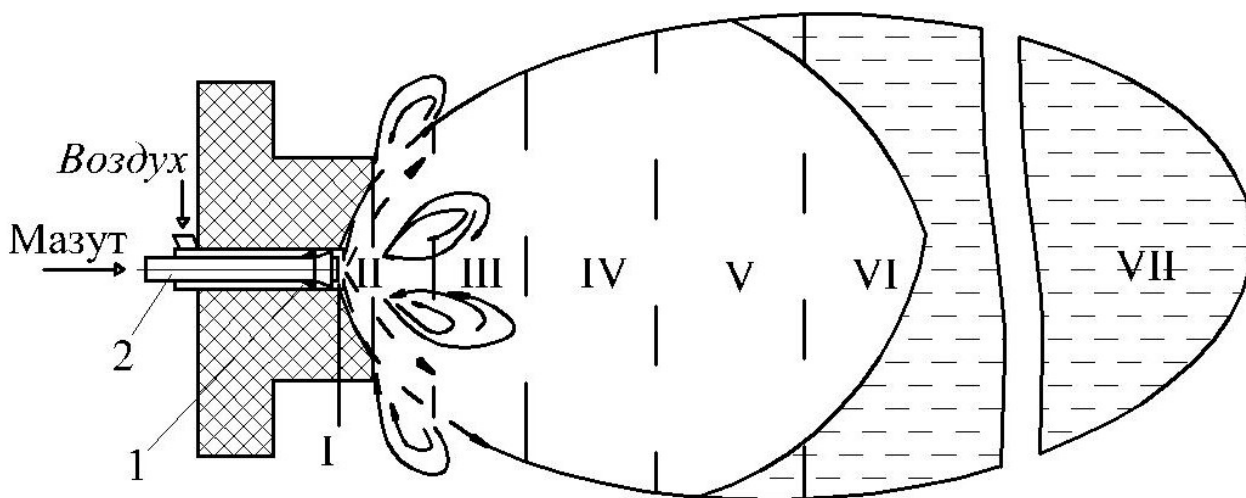


Рис. 1.25. Структура диффузионного факела:  
1 – воздухозакручивающий аппарат; 2 – форсунка;  
I ... VII – условные зоны факела

Перемешивание в зоне IV достаточно интенсивно: крупномасштабная турбулентность, значение которой зависит от энергии воздушного потока на выходе из воздугонаправляющего устройства, имеет еще высокий уровень. В этой зоне горящий факел расчленяется на отдельные очаги горения. Происходит это в результате возникновения в турбулентном потоке объемов с большой концентрацией топлива и с отсутствием топлива. Такая структура факела приводит к неполному сгоранию топлива. Основное влияние на выравнивание соотношения топливо-воздух по сечению факела оказывают крупномасштабные пульсации - взаимодействия между горящими и негорящими вихревыми образованиями факела. В зоне V продолжается взаимодействие вихревых образований и выгорание топлива. Горят пары топлива, не сгоревшие в предыдущей зоне, а также тяжелые углеводороды, сажа и коксовые частицы, образовавшиеся в зонах III и IV в результате перегрева капель при испарении. Горение глубоко диффузионное. Существенную роль при таком горении играет как крупномасштабная, так и мелкомасштабная турбулентность потока. Перемешивание крупных объемов и массообмен во всем сечении факела обеспечивается крупномасштабной турбулентностью, а перемешивание внутри отдельных объемов - мелкомасштабной турбулентностью. Степень выгорания топлива в этой зоне определяется равномерностью распределения топлива по сечению факела, достигнутой в зоне II. Протяженность зоны V (в конце ее выгорает 98...99% топлива) зависит также от структуры турбулентности в этой зоне и от коэффициента избытка воздуха в зоне I. Увеличение последнего ускоряет процесс диффузионного выгорания. В зоне VI происходит диффузионное дожигание твердой фазы. Полное дожигание твердых частиц затруднено по двум причинам:

низкая температура в конце факела (1000...1200°C) и отсутствие мелкомасштабной турбулентности. Поэтому абсолютно полное сгорание жидкого топлива в факеле практически недостижимо; неполнота горения (механическая) для конкретных топливосжигающих установок нормируется. Зона VII - это зона движения продуктов сгорания по тракту установки. Приблизительная протяженность зон I...VI по оси факела в долях диаметра устья горелочного устройства  $D_{ГУ}$  для закрученной струи топливовоздушной смеси приведена в табл. 1.4.

Таблица 1.4

**Протяженность зон (по рис. 1.25)**

<b>Номер зоны</b>	<b>Процесс, происходящий в зоне</b>	<b>Протяженность зоны</b>
I	Турбулизация и подача воздуха	-
II	Распределение капель топлива в воздухе, его подогрев и частичное испарение	0,5 $D_{ГУ}$
III	Испарение и кинетическое горение	(0,75...1,0) $D_{ГУ}$
IV	Испарение и начало диффузионного горения	1,5 $D_{ГУ}$
V	Диффузионное горение	(2...3) $D_{ГУ}$
VI	Диффузионное дожигание	(3...5) $D_{ГУ}$

Длина факела

Выше было показано, что дальность полета отдельной капли зависит от начальных диаметра и скорости ее. Если учесть, что диаметр горячей капли уменьшается в полете (рис. 1.26), то, очевидно, что в этом случае уменьшается и дальность ее полета.

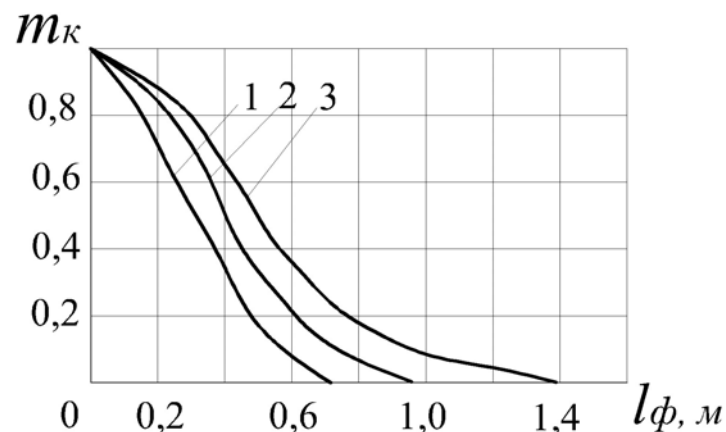


Рис. 1.26. Уменьшение относительной массы горячей капли по длине факела в зависимости от начальной скорости  $v$  м/с: 1 -  $v = 100$ ; 2 -  $v = 40$  ; 3 -  $v = 20$

Для капли максимального диаметра дальность полета будет также максимальной, и длина факела могла бы быть принята равной этой дальности. Однако длина факела определяется не только условиями испарения топлива, но и условиями смесеобразования. Учитывая это, длину факела  $l_{\phi}$  можно определить из выражения

$$l_{\phi} = k_1 w_x d_{\max}^2 + k_2 \frac{\sqrt{w_x}}{w} \left( \frac{c_H}{c_K} \right)^2 \sqrt{B}, \quad (1.23)$$

где  $k_1$  и  $k_2$  - коэффициенты пропорциональности;  $w_x$  и  $w$  - осевая составляющая скорости и полная скорость потока;  $c_H$  и  $c_K$  - соответственно концентрация топлива в начальном сечении факела и в конце факела;  $B$  - производительность форсунки.

Первое слагаемое в уравнении (1.23) - часть длины факела, определяемая условиями испарения топлива, второе слагаемое - условиями перемешивания газообразной фазы.

После ряда упрощений это уравнение можно записать в виде

$$l_{\phi} = k_1 \left( \frac{\alpha}{\alpha - 0,5} \right)^2 B^m, \quad (1.24)$$

где  $\alpha$  - коэффициент избытка воздуха, подаваемого в горелку;  $m$  - коэффициент, учитывающий условия смесеобразования (рис. 1.27);  $k_1$  - коэффициент, учитывающий условия испарения. При сжигании в закрученной струе мазута  $40 - k_1 = 1,27$ ; мазута  $100 - k_1 = 1,5 \dots 1,65$ ; при сжигании в прямоточной струе  $k_1 = 0,95$ .

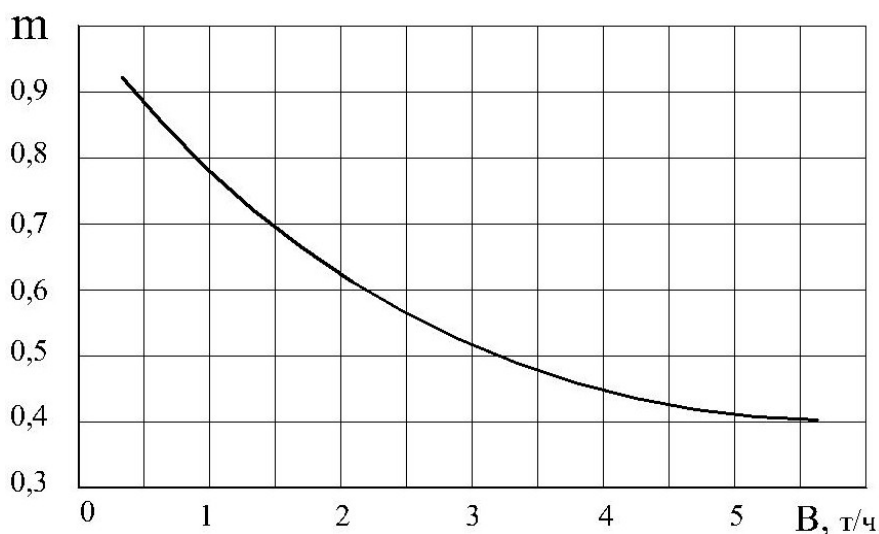


Рис. 1.27. Влияние производительности горелки на коэффициент смесеобразования  $m$

Увеличение коэффициента  $k_1$  при переводе топочного устройства с мазута 40 на мазут 100 объясняется следующим. Известно, что при кипении капли мазута сначала испаряются легкие фракции, температура кипения при этом возрастает. Соотношение между количеством легких и тяжелых фракций характеризуется коэффициентом состава топлива  $k_{\text{сост}}$ . Начальная температура кипения у мазутов 40 и 100 одинакова,  $t_{\text{нач}} = 250^\circ\text{C}$ , но коэффициенты  $k_{\text{сост}}$  резко отличаются: у мазута 40  $k_{\text{сост}} = 0,35$ , у мазута 100  $k_{\text{сост}} = 0,72$ . Поэтому температурный перепад  $\Delta t_k = t_r - t_k$  в процессе испарения для мазута 100 значительно меньше, чем для мазута 40, а значит меньше и скорость испарения. При переводе топочного устройства с мазута 40 на сжигание мазута 100 длина факела значительно увеличивается.

Длина факела, строго говоря, является величиной неопределенной. Так, изменение требований к полноте сгорания в конце факела ( $q_{3+4}$  изменяется от 1,0 до 0,5%) соответствует удлинению факела на 20%, а абсолютно полному сгоранию теоретически соответствует  $l_{\text{ф}} = \infty$ . На практике за длину факела принимают расстояние от устья горелки до того места факела, где недожог составляет 1%. Длина факела, найденная из выражения (1.24) соответствует этому условию.

Если исходить из условия, указанного ранее, что длина факела определяется временем испарения и горения крупных капель, то для определения  $l_{\text{ф}}$  можно воспользоваться выражением

$$l_{\text{ф}} = D_{\text{Гу}} + k\sqrt{B}, \quad (1.25)$$

где  $k$  - коэффициент, учитывающий равномерность распределения топлива в факеле, физические свойства топлива и среды в топке и условия подачи воздуха; для горелок прямоточного типа  $k = 4,5 \dots 5,0$ ; для вихревых горелок  $k = 3,0 \dots 4,0$ .

В вертикальных топках вследствие действия подъемных сил общая длина факела складывается из горизонтальной и вертикальной составляющих. Горизонтальная составляющая определяется из выражения

$$l_{\text{фг}} = k_{\text{г}} l_{\text{ф}}, \quad (1.26)$$

где  $l_{\text{ф}}$  определяется из (1.24) или (1.25);  $k_{\text{г}}$  - коэффициент, зависящий от осевой скорости  $w_x$  в амбразуре горелки (см. табл. 1.5).

Вертикальная составляющая

$$l_{фв} = k_{в} l_{ф}, \quad (1.27)$$

где  $k_{в}$  - коэффициент, зависящий от видимого теплонапряжения в сечении топки (таблица 1.5).

Таблица 1.5

### Выбор коэффициентов $k_{Г}$ и $k_{в}$

$w_{к}, м/с$	20	35	50	65
$k_{Г}$	0,4	0,45	0,5	0,55
$q_{Г}, МВт/м^2$	2,3	5,8	9,3	
$k_{в}$	0,6	0,7	0,6	

Длина факела зависит от многих взаимосвязанных величин - рис. 1.28; ею можно управлять, например, изменением дисперсности распыливания, удельным расходом распылителями т.п. Однако следует помнить, что организация сжигания жидкого топлива, в том числе и длина факела, определяется конструктивными и технологическими характеристиками топки. Так, короткий факел свидетельствует об интенсивном и экономичном горении в ограниченном объеме топочной камеры. Но с другой стороны излишнее укорочение факела приведет к росту тепловых потоков на уровне горелок и к значительному падению температуры в остальном топочном пространстве, что отрицательно скажется на экономичности и надежности установки. В этом случае для лучшего заполнения камеры сгорания факелом и выравнивания температур следует удлинить факел, например, укрупнив распыл.

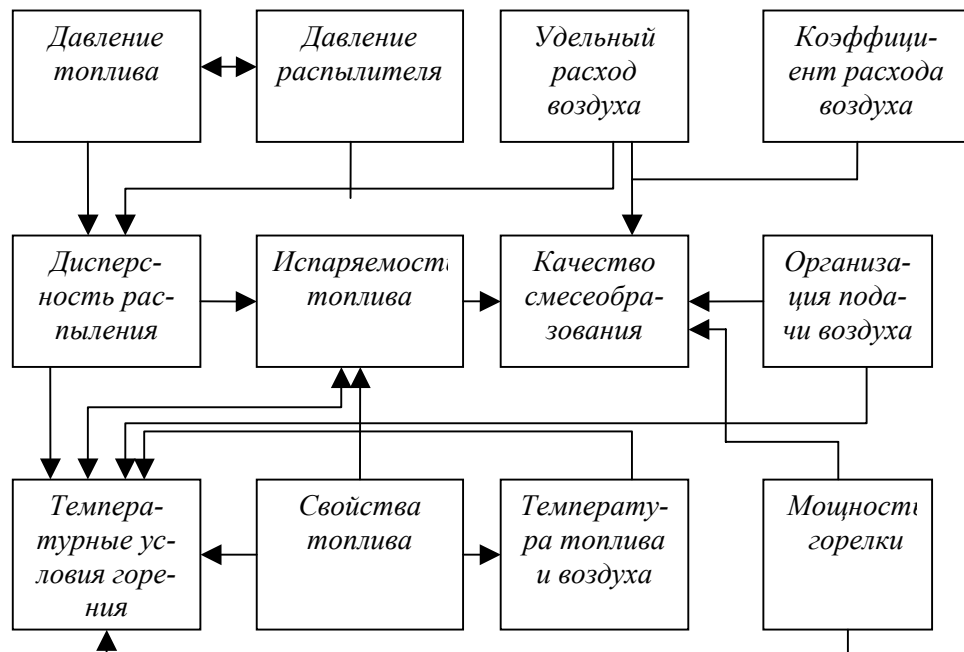


Рис. 1.28. Классификация взаимосвязанных величин, влияющих на длину факела

### Форма факела

Самым узким и самым длинным является факел прямоточной струи, формируемый струйными механическими, пневматическими и вентиляторными форсунками. Расширение факела и уменьшение его длины достигается при использовании центробежных и ротационных механических, щелевых и турбулентных пневматических и паровых, а, также турбулентно-вихревых вентиляторных горелочных устройств. При использовании последних ширина факела, определяемая углом его раскрытия  $\beta_\phi$ , зависит от степени крутки  $n$  (см. раздел I.I). Однако следует учитывать, что чем больше степень крутки, тем труднее получить необходимую равномерность распределения топлива и воздуха в начальном сечении факела. С увеличением степени крутки может произойти затягивание рециркуляционной зоны факела внутрь горелочной амбразуры, при этом происходит заброс топлива в проточную часть горелки и обгорание элементов горелок. При очень сильной закрутке воздуха может возникнуть разомкнутое течение, когда воздушная струя на выходе горелки раскрывается на угол  $\beta_\phi = 180^\circ$  и более, в этом случае распределение топлива и воздуха полностью нарушается, горелка становится неработоспособной. Оптимальный угол закрутки, примерно равный углу наклона лопаток завихрителя, составляет  $30...60^\circ$ , угол раскрытия факела при этом не достигает опасных значений (рис. 1.29).

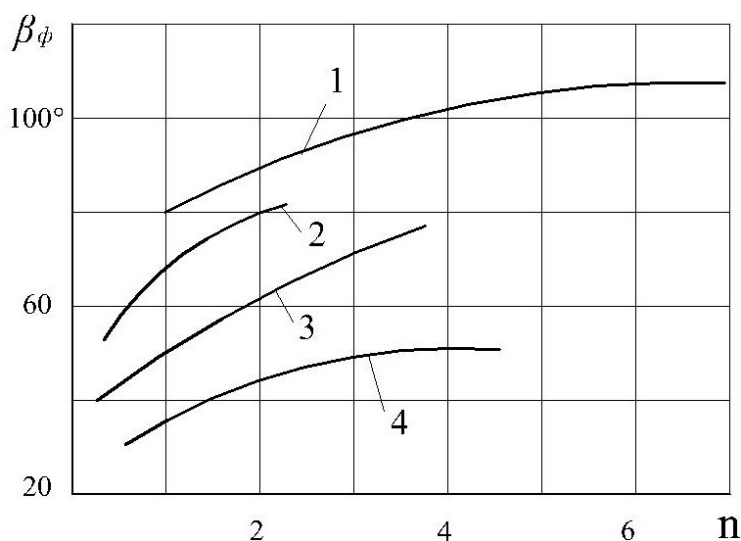


Рис. 1.29. Влияние степени крутки на угол раскрытия факела:  
1 - для горелок типа У ( $a/b = 0,4$ ); 2 - типа АТ ( $\beta = 25...65^\circ$ ,  $\alpha = 20...45^\circ$ );  
3 - типа Т ( $b/d = 1,0$ ); 4 - типа ТЛ ( $\alpha = 30^\circ$ ).

При снижении нагрузки угол раскрытия факела возрастает; так, при переходе от 100% до 50% нагрузки у механических форсунок  $\beta_\phi$  увеличивается на 10%, у форсунок со сливом - на 20%.

Рекомендуемые углы раскрытия для конуса факела распыливания форсунок:  $(55 \pm 5)^\circ$  - для горелки производительностью меньше 3,8 ГДж/ч (1 МВт);  $(70 \pm 5)^\circ$  - меньше 32,7 ГДж/ч (9 МВт);  $(85 \pm 5)^\circ$  - меньше 81,2 ГДж/ч (22,5 МВт)



и угол раскрытия больше  $85^\circ$  - для горелки производительностью больше  $81,2$  ГДж/ч ( $22,5$  МВт).

В центре закрученного факела образуется область пониженных давлений, поэтому в нем образуется зона обратных течений, зона рециркуляции горячих продуктов сгорания и воздуха к устью горелки (рис. 1.30).

Диаметр этой зоны и ее длина связаны со степенью крутки соотношениями

$$D_{\text{рец}} = D_{\text{гу}} (0,1n + 0,26); \quad (1.28)$$

$$l_{\text{рец}} = D_{\text{гу}} (0,7n^{\frac{2}{3}} + 0,26). \quad (1.29)$$

#### Условия сжигания и устойчивость горения

Экспериментами установлено, что при малых расстояниях между каплями константа испарения (см. табл. 1.3) перестает быть постоянной величиной. Это объясняется двумя факторами: сближение горящих капель уменьшает потери теплоты (растет локальная температура) и ухудшается доставка кислорода в зону совместного горения. Такие условия при качественном смесеобразовании возникают в сравнительно небольшой части факела (зона III, рис. 1.25); уже в зоне IV расстояние между каплями составляет  $3 \dots 4$  диаметра их и взаимное влияние горящих капель исчезает. В этом случае горение распыленного жидкого топлива в факеле происходит в соответствии с законом Срезневского (см. 1.18). Однако при плохом смешении топлива и окислителя (большой неравномерности плотности орошения) взаимное влияние горящих капель продолжается в зоне IV и далее. Это приводит к увеличению заполнения факелом топочного объема.

При сжигании жидкого топлива при хорошем смесеобразовании в ядре факела наблюдается яркий желтый свет, а границы факела четко выражены. Хорошая светимость и радиация факела достигается при подводе к его корню всего необходимого для горения количества воздуха (желательно подогретого). Для увеличения лучеиспускательной способности факела сажистые частицы должны быть накалены и равномерно распределены по всему объему. При соблюдении этих условий ориентировочное значение степени черноты мазутного факела  $\epsilon_{\text{ф}} = 0,85$ .

Организация горения с наилучшими показателями (полнота сгорания, светимость факела, его длина, симметричность и форма, заполнение факелом топочного пространства) зависит от многих взаимосвязанных факторов (рис. 1.28). Качество сгорания характеризуется также стабильностью положения фронта горения (на некотором расстоянии от устья горелки) и устойчивостью горения при различных нагрузках. В целом можно сказать, что качество сжигания определяется конструктивными характеристиками топочных устройств и технологическими приемами подготовки топлива к сжиганию.

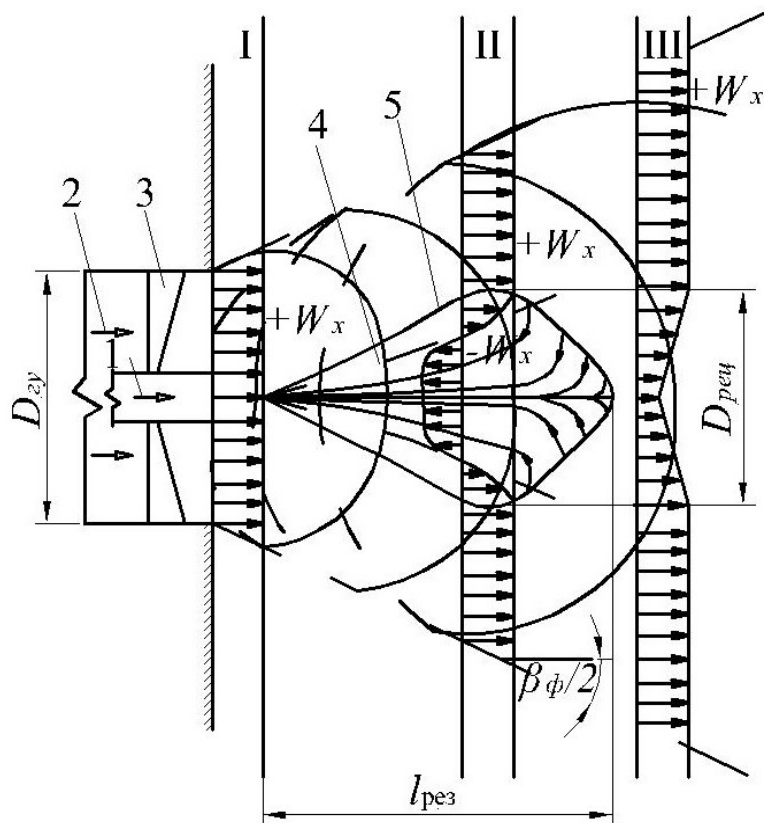


Рис. 1.30. Структура поля закрученной струи:

1 - поток топлива; 2 - поток воздуха; 3 - лопаточный завихритель; 4 - линия постоянной массы рециркулирующего потока; 5 - граница зоны рециркуляции; I...III - эпюры осевых составляющих скорости.

Некачественное изготовление распыливающих сопел форсунок или их абразивный износ в процессе эксплуатации приводит к повышенному расходу топлива, факел искривляется. Засорение форсунки, вентилей и клапанов в топливоподающих магистралях с последующим "прорывом" расхода топлива вызывает неустойчивость факела. Нарушение соосности форсунки и воздухоподающих каналов, неравные размеры проходных окон для воздуха вызывают искривление факела. Различные дефекты амбразуры горелок (невыдерживание угла раскрытия амбразуры, ее симметричности и др.) могут привести к неустойчивости пламени, вибрации, плохому смесеобразованию с воздухом, ухудшению распыла, погасанию (отрыву) факела.

Выше пояснялась зависимость стабильности фронта воспламенения от нормальной скорости распространения пламени  $U_n$  и осевой составляющей скорости поступления топливоздушной смеси  $w_x$  (рис. 1.24). При увеличении  $U_n$  ( $U_{n2}$  на рис. 1.31) и неизменной  $w_x$  (кривая  $w_{x1}$ ) фронт пламени переместится из первоначального состояния (•) 1 в (•) 2, т.е. ближе к устью горелки. При неизменной  $U_n$  и возрастающей начальной скорости  $w_x$  увеличивается время индукции, и фронт воспламенения смещается вглубь топки ((•) 3 при  $U_n = U_{n1}$  и  $w_{x2} > w_{x1}$ ).

Некоторые пояснения: как указывалось выше,  $U_n$  зависит только от давления, температуры, концентрации и химической природы реагирующих ве-

ществ, поэтому  $U_n = \text{const}$  независимо от изменения скорости подачи топливоздушной смеси. Для воспламенения жидкого топлива необходимо, чтобы испарилось достаточное его количество (не менее 20%); при увеличении начальной скорости истечения до  $w_{x2}$  и прочих равных условиях нужное количество топлива испарится за то же время, что и при первоначальной скорости  $w_{x1}$ , но топливоздушная смесь за это время пройдет большее расстояние и зона воспламенения отодвинется от устья горелки. На этом расстоянии скорость топливоздушной смеси снизится, установится стабильный фронт воспламенения в (·) 3 при соблюдении равенства  $w_{x2} = w_{x1} = U_{n1}$ .

При дальнейшем росте скорости истечения ( $w_{x3}$ ) теоретически может быть достигнуто условие  $U_{n1} = w_{x3}$ , однако, при некоторой достаточно большой скорости  $w_{x3}$  будут нарушены другие условия стабильного воспламенения и устойчивого горения: в топливоздушной смеси значительно увеличится концентрация продуктов сгорания, резко уменьшится коэффициент диффузии (см. (2.28)), возрастет время взаимной диффузии горючего и окислителя, снизится температура топливоздушной смеси. В этом случае происходит отрыв факела, горение прекращается.

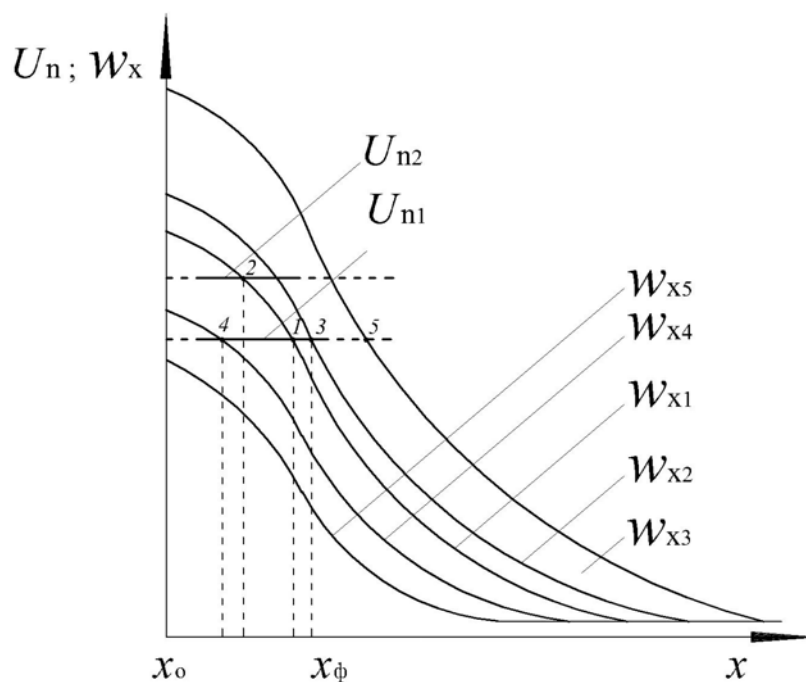


Рис. 1.31. Положение фронта воспламенения в зависимости от нормальной скорости распространения пламени  $U_n$  и скорости истечения топливоздушной смеси  $w_x$ ;

1...4 - точки стабильного положения фронта воспламенения; 5 – точка возможного прекращения воспламенения

При снижении начальной скорости  $w_x$  фронт пламени смещается к устью горелки (в (·) 4  $U_{n1} = w_{x4}$ ), при дальнейшем снижении  $w_x$  пламя может быть затянуто в амбразуру горелки, что приведет к обгоранию элементов горелочного устройства. Еще большее снижение начальной скорости истечения топливоз-

душной смеси приведет к проскоку пламени и погасанию факела (кривая  $w_{x3}$  нигде не пересекается с прямой 3-1-4, т.к. за устьем горелки  $w_x < U_n$ ).

**В л и я н и е т о н и н ы р а с п ы л а:** количество испаренного топлива при прочих равных условиях возрастает с увеличением площади поверхности единицы массы топлива. Увеличение доли крупных капель приводит к увеличению времени испарения топлива до достижения необходимой для воспламенения концентрации топливных паров, т.е. к росту времени индукции и смещению фронта пламени от устья горелки. При дальнейшем росте диаметра капель и уменьшении количества мелких капель процесс испарения затянется настолько, что необходимая для воспламенения концентрация паров топлива не будет достигнута и факел погаснет.

**В л и я н и е т е м п е р а т у р н о г о у р о в н я в т о п к е:** теплоотвод от горящего факела определяется долей тепловыделения факела, затрачиваемой на нагрев ограждающих экранных поверхностей топки и нагрев, испарение и воспламенение свежих порций топлива. Уменьшение по различным причинам тепловыделения факела и увеличение относительного теплоотвода к экранам топки (уменьшение отдачи теплоты от стен топочной камеры) приводит к снижению температурного уровня зоны подготовки топлива, к росту времени индукции и, в предельном случае, к погасанию факела (например, при снижении нагрузки).

**П л о т н о с т ь о р о ш е н и я:** хорошее перемешивание капель топлива с воздухом обеспечивается равномерностью раздачи топлива на срезе форсунки и равномерным по сечению факела внедрением капель в воздушный поток (см. также (2.7)). При нарушении этих условий в части факела с большей плотностью орошения мелкие капли сталкиваются, сливаясь в капли крупных размеров, возрастает время индукции и длина факела, факел искривляется, что приводит к неравномерности тепловосприятия экранными трубами.

**В л и я н и е в о з д у х а и т о п л и в а:** при подаче малого количества воздуха ( $\alpha$  близок к единице) ухудшается смесеобразование и выделяющейся при горении теплоты становится недостаточно для поддержания горения. При подаче чрезмерно большого количества холодного воздуха топливовоздушная смесь может настолько охладиться, что воспламенение будет исключено. При значительном увлажнении или перегреве мазута парогазовые прослойки могут вызывать пульсацию и хлопки горения, ведущие иногда к срыву факела.

**С т а б и л и з а ц и я г о р е н и я:** существует ряд способов обеспечения непрерывности процесса прогрева и поджигания горючей смеси, а также стабильного поддержания фронта горения в удобной (для экономичности горения и надежности элементов горелки) зоне факела. В общем виде этот процесс, называемый стабилизацией, заключается в создании в факеле неподвижной высокотемпературной зоны, поджигающей поступающую из горелочного устройства топливовоздушную смесь. Стабилизация фронта пламени может осуществляться вводом в факел нагретого тела, электрической спирали, пилотной горелки и т.п. Лучшие результаты дают различные приемы аэродинамической стабилизации. Выше рассматривалась аэродинамика сильно закрученной топливовоздушной струи, где к корню факела рециркулируют раскаленные продукты

горения с его периферийной и центральной зон. Таким образом, для горелок с закрученной струей при номинальных нагрузках стабилизация фронта пламени осуществляется аэродинамикой факела.

При снижении нагрузки энергии слабо закрученной струи становится недостаточно для стабильного поддержания фронта пламени. Для таких потоков и для прямоточных горелочных устройств с целью создания зон стабилизации горения используют плохообтекаемые тела (стабилизаторы), устанавливаемые на пути воздушного или топливовоздушного потока. При ламинарных режимах течения потока это тело создает поджигательное кольцо, удерживающее фронт пламени в фиксированном положении. При турбулентном режиме за плохообтекаемым телом образуются зоны с отрицательным давлением (см. рис.1.30), что приводит к образованию вихрей рециркулирующих к устью горелки раскаленных топочных газов. Возможные конструкции стабилизаторов показаны на рис.1.32. Наилучшим из стабилизаторов является лопаточный (рис.1.32б): при одинаковом диаметре, например, с дисковым, у лопаточного стабилизатора длина зоны противотока больше, а сопротивление значительно меньше.

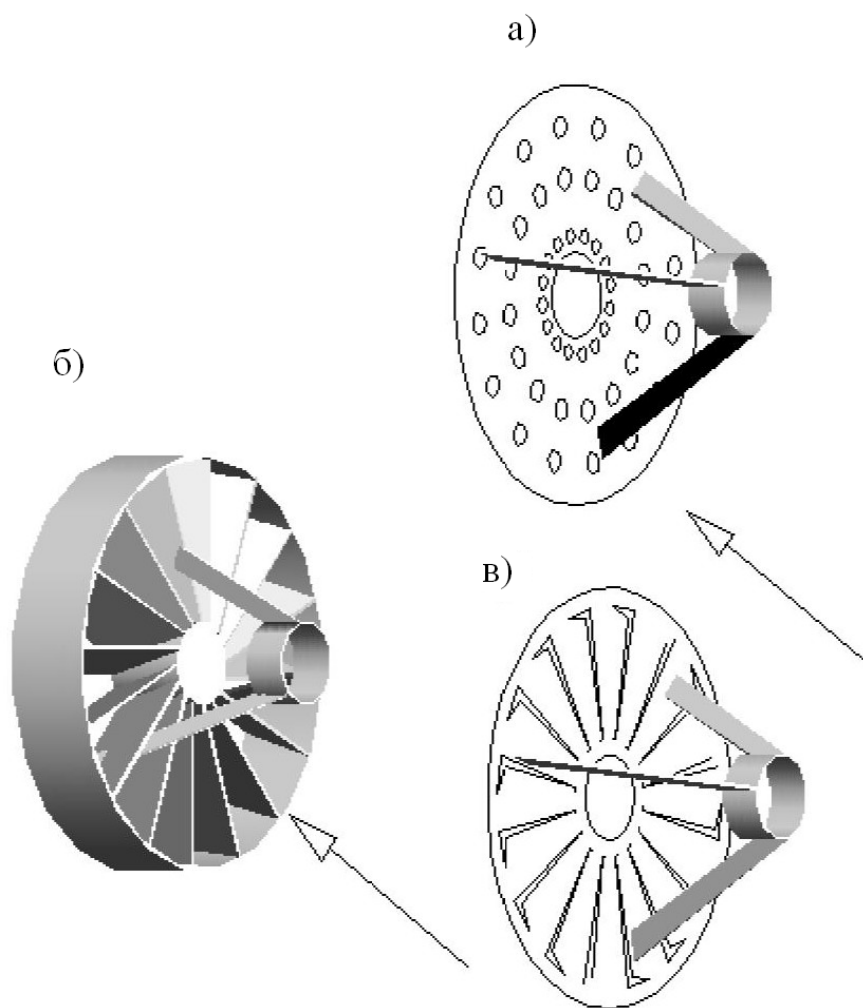


Рис.1.32. Схемы стабилизаторов:  
а) - дисковый; б) - лопаточный; в) - чашечный

Стабилизирующие свойства зависят от диаметра стабилизатора (рис. 1.33)

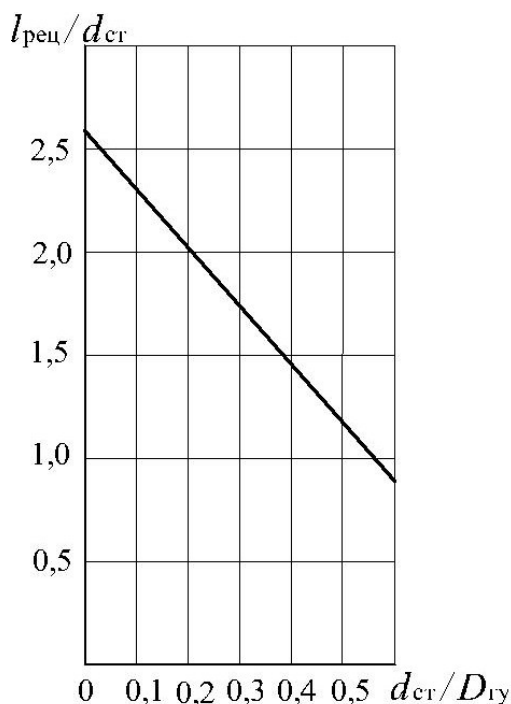


Рис. 1.33. Выбор диаметра стабилизатора

#### Экономичность горения

Конечные характеристики выгорания топлива в факеле определяются скоростью выравнивания концентрации топлива и воздуха во всех точках факела, которая зависит от исходного избытка воздуха и качества распределения топлива по сечению в зонах I и II (рис. 1.25). При слишком малых коэффициентах избытка воздуха в факеле образуются твердые частицы. Причина их возникновения - возгонка капель и пиролиз паров топлива при нехватке воздуха в отдельных объемах факела и, соответственно, снижении температуры. При низкой температуре мазута количество твердой фазы, образующейся в факеле, возрастает. Твердые частицы имеют довольно крупные размеры (до 20% массы капли) и видны в топке в виде так называемых «мух». При повышении коэффициента избытка воздуха концентрация твердой фазы снижается, а при дальнейшем росте  $\alpha$  вновь возрастает, т.к. снижается температура факела и топочных газов при их разбавлении относительно холодным воздухом. Таким образом, существуют оптимальный коэффициент избытка воздуха и температура факела (или видимое теплонапряжение топочного объема  $q_v$ ), при которых образование твердой фазы и, соответственно, механическая неполнота сгорания  $q_{\text{мн}}$  будет минимальна. Для хорошо организованного мазутного факела она не превышает 0,1...0,2%.

Химическая неполнота сгорания жидкого топлива формируется только за счёт CO и H<sub>2</sub>, потеря теплоты при этом составляет, %

$$q_{\text{хн}} = 1,4(3\text{CO} + 2,5\text{H}_2)\alpha, \quad (1.30)$$

где  $\alpha$  - коэффициент избытка воздуха, определяемый по углеродной (углекислотной) формуле [1], а CO и H<sub>2</sub> - экспериментально по хроматографическому анализу дымовых газов. Как и механический, химический недожог возрастает с увеличением степени неравномерности смешения топлива и воздуха и зависит от коэффициента избытка воздуха (рис. 1.34).

Существует критический (минимальный) коэффициент избытка воздуха, выше которого CO и H<sub>2</sub> не образуются. При  $\alpha$  ниже критического появляется химическая неполнота сгорания, и она резко увеличивается с дальнейшим понижением  $\alpha$ .

На экономичность сжигания при использовании форсунок с распылителем оказывает большое влияние начальная температура распылителя. Известно, что скорость распылителя (пара или воздуха) равна, м/с

$$w_p = \phi 1,4 \sqrt{h_1 - h_2} = \phi 1,4 \sqrt{h_0}, \quad (1.31)$$

где  $\phi$  - коэффициент истечения распылителя (для паровоздушных форсунок высокого давления  $\phi = 0,85$ );  $h_1$  и  $h_2$  - энтальпия распылителя до и после расширения, Дж/кг;  $h_0$  - теплоперепад в струе распылителя при адиабатном расширении, Дж/кг. В реальных условиях действительный теплоперепад  $h$  меньше адиабатного:

$$h = \eta_p h_0, \quad (1.32)$$

где  $\eta_p$  - политропный КПД расширения, называемый также внутренним или индикаторным КПД,  $\eta_p = 0,5 \dots 0,6$ .

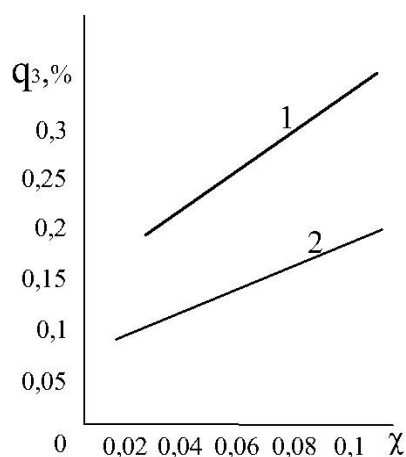


Рис. 1.34. Потери теплоты  $q_3$  в зависимости от степени неравномерности  $\chi$  смешения топлива и воздуха:

$$1 - \alpha = 1,05; \quad 2 - \alpha = 1,10.$$

В табл. 1.6 приведены сравнительные характеристики распылителей до и после расширения: пара насыщенного и перегретого и воздуха холодного и подогретого.

Таблица 1.6

**Основные характеристики распылителя  
в начале и в конце расширения**

Величина	Пар, $p_1=1,0$ МПа		Воздух, $p_1=0,7$ МПа	
	насыщенный	перегретый $t_1 = 360^\circ\text{C}$	$t_1 = 40^\circ\text{C}$	$t_1 = 300^\circ\text{C}$
Удельный объем начальный $v_1, \text{м}^3/\text{кг}$	0,198	0,293	0,131	0,24
Энтальпия, кДж/кг:				
начальная $h_1$	2770	3150	4,0	305
конечная $h_2$	2380	2650	101	58,6
Располагаемый теплоперепад $h$ , кДж/кг	388	510	129	248
Сухость пара в конце расширения $x$	0,87	0,996	—	—
Температура в конце расширения $t_2, ^\circ\text{C}$	100	100	-93	60
Скорость истечения, м/с:				
максимальная $w_{\text{max}}$	880	1010	510	700
критическая $w_{\text{кр}}$	460	570	324	440
Максимальный расход на 1 $\text{м}^2$ выходного сечения форсунки $G_p, \text{кг/с}$	1420	1220	1560	1150

На основании анализа данных, приведенных в таблице 1.6, можно сделать выводы о преимуществах использования перегретого пара и подогретого воздуха:

1. Энтальпия пара в конце расширения повышается на 270 кДж/кг. Сухость насыщенного пара в конце расширения по сравнению с перегретым меньше на 0,13, на испарение этой влаги надо затратить  $0,13r = 0,13 \cdot 2240 = 293$  кДж/кг. Следовательно, при перегреве пара до  $360^\circ\text{C}$  в топку вводится на  $270 + 293 = 563$  кДж/кг больше, чем при распылении топлива насыщенным паром. При расходе 0,35 кг пара на 1 кг мазута с теплотой сгорания  $Q_H^p \cong 40000$  кДж/кг экономия топлива составит

$$ДВ_{\text{пп}} = \frac{100Q_y}{Q_H^p} = \frac{100(0,35 \cdot 563)}{40000} = 0,49\%$$



2. Влагосодержание воздуха при  $t_1 = 40^\circ\text{C}$  и давлении 0,7 МПа составляет 6,8 г/кг. При охлаждении воздуха в конце расширения до  $t_2 = -93^\circ\text{C}$  водяные пары почти целиком ( $\sim 6,5$  г/кг) выпадают в виде капельной влаги, на испарение которой требуется  $6,5 \cdot 10^{-3} \cdot r = 6,5 \cdot 10^{-3} \cdot 2240 = 14$  кДж/кг. Подогретый до  $t_1 = 300^\circ\text{C}$  воздух в конце расширения имеет температуру  $t_2 = 60^\circ\text{C}$ , что соответствует увеличению теплоты, введенной в топку (по сравнению с холодным воздухом), на 160 кДж/кг. Всего дополнительно вводится в топку  $160 + 14 = 174$  кДж/кг. При расходе 0,35 кг воздуха на 1 кг мазута экономия топлива составит

$$\text{ДВ}_{\text{ГВ}} = \frac{(174 \cdot 0,35) \cdot 100}{40000} = 0,15\%.$$

При повышении температуры распылителя уменьшается его расход. На рис. 1.35 показано влияние перегрева пара и подогрева воздуха на экономию расхода распылителя.

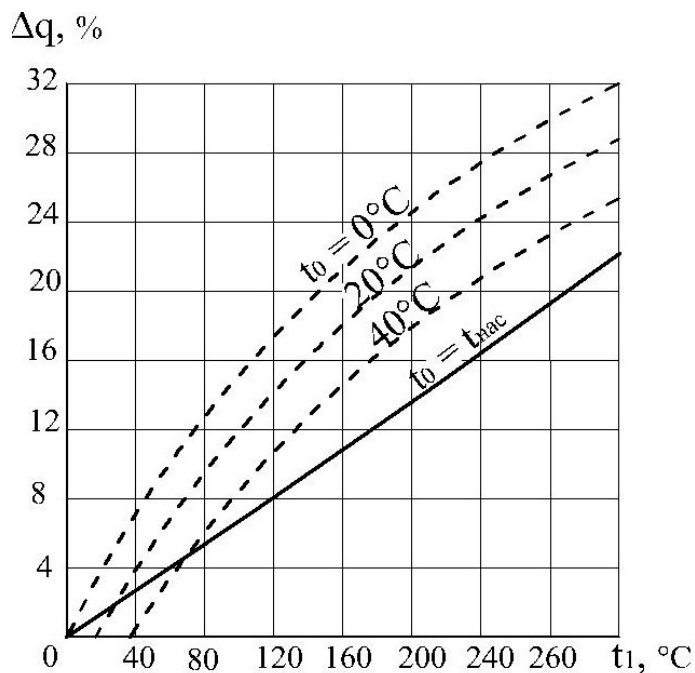


Рис. 1.35. Экономия распылителя  $\Delta q$  (в %-х от расхода холодного воздуха или насыщенного пара) в зависимости от температуры горячего воздуха или температуры перегрева пара от  $t_{\text{нас}}$  до  $t_{\text{пп}}$   
 ----- воздух; \_\_\_\_\_ пар

Для рассмотренного выше случая пар давлением 1,0 МПа от состояния насыщения до  $t_2 = 360^\circ\text{C}$  должен быть подогрет на  $180^\circ\text{C}$ , экономия пара, идущего на распыл, составит 14% (рис. 1.35). Экономия распыливающего воздуха при подогреве его от  $40^\circ\text{C}$  до  $300^\circ\text{C}$  составит 26% (рис. 1.35).

## 1.4. Форсунки для сжигания жидкого топлива

Существует два способа распределения жидкого топлива в окислителе: 1) подготовка топливоздушной монодисперсной эмульсии (первичная смесь) и раздача ее струями в движущийся поток воздуха, образовавшаяся при этом горючая смесь подается в топочную камеру; 2) распыление топлива различными способами (см. раздел I.I) и внедрение капель полифракционного состава в поток воздуха. Второй способ имеет наибольшее практическое применение, реализуется он с помощью форсунок различного типа (рис. 1.36). Горелочное устройство или горелка представляет собой инженерную конструкцию, состоящую из двух узлов - форсунки и устройства для подачи организованного потока воздуха.

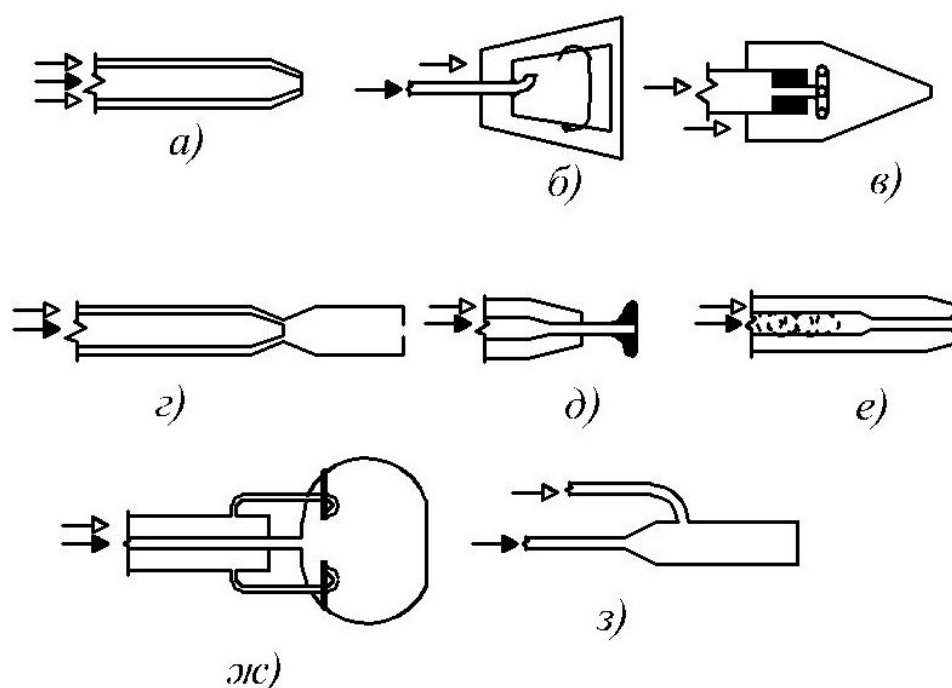


Рис. 1.36. Схемы форсунок для распыливания жидкого топлива:  
а) струйная; б) центробежно-ротационная; в) центробежно-механическая;  
г) эмульсионная; д) ультразвуковая струйная; е) ультразвуковая вихревая;  
ж) ультразвуковая; з) струйная У-образная

Развитие конструкций форсунок для факельного сжигания жидкого топлива началось со струйного и механического принципов, затем для механических форсунок был использован центробежный эффект; в дальнейшем для распыления топлива в форсунках стала использоваться кинетическая энергия пара или воздуха. Многообразие технологий топливоиспользующих установок предопределило большое количество различных типов форсунок, которые можно классифицировать в зависимости от их конструкции и технологии работы:

1. Механические форсунки: а) брандсбойтные (с прямоструйным осевым движением топлива, продавливаемого через одно или несколько отверстий); б) вихревые (с завихривающимися винтовыми или тангенциальными каналами раз-

дачи топлива); в): центробежные (с тангенциальным подводом топлива в камеру); г) ротационные (с разбросом и распылением топлива, вращающимся устройством форсунки).

*По способу регулирования нагрузки* механические форсунки делятся на: а) с регулированием давления топлива; б) с регулированием числа выходных отверстий; в) с обратным сливом, т.е. с обратным отводом части неиспользованного топлива; г) с двумя ступенями и с одним выходным соплом (при снижении нагрузки одна ступень отключается); д) с двумя ступенями и с двумя выходными соплами (вторая ступень включается, когда требуется нагрузка, превышающая производительность по топливу первой ступени форсунки).

2. Форсунки высокого давления: а) по виду распыляющей среды (паровые и воздушные); б) по форме выходного отверстия (плоские или щелевые и круглые);

*по движению топливозвоздушной смеси:* а) прямоструйные (одноструйные и многосопловые), б) вихревые, в) турбулентно-вихревые;

*по способу распыления и образования смеси с распылителем:* а) с внутренним распылением и смесеобразованием, б) с наружным распылением и смесеобразованием;

*по числу ступеней распыления:* а) одноступенчатого распыления, б) двух - и многоступенчатого распыления.

3. Форсунки низкого давления: а) прямоструйные, б) встречных потоков топлива и окислителя, в) внутреннего распыления, г) смешанного распыления;

*по способу регулирования:* а) с регулируемыми выходными скоростями воздуха и топлива и постоянными сечениями выходных отверстий, б) с регулируемыми выходными сечениями для воздуха, в) двухпроводные с постоянным первичным потоком воздуха и регулируемым вторичным, г) с регулируемыми выходными сечениями и постоянными скоростями воздуха и топлива.

4. Комбинированные форсунки: а) по комбинации способов распыления (паровоздушные – с комбинированным распылением вентиляторным воздухом и паром; паро- или пневмомеханические); б) по комбинации сжигаемого топлива (газوماзутные, пылемазутные, пылегазوماзутные).

В котельных установках используются горелочные устройства, в состав которых входят следующие типы форсунок.

#### Механические форсунки

Для котлов малой и средней мощности заводом "Ильмарине" выпускаются форсунки ОН-521 и ОН-547 (рис. 1.6), малые форсунки имеют типоразмеры от ОН-521-01 до ОН-521-10; при давлении мазута 2,0 МПа их пропускная способность изменяется от 80 кг/ч до 660 кг/ч, при давлении мазута 3,5 МПа - от 110 до 860 кг/ч. Диаметр сопла в зависимости от типоразмера изменяется от 1,5 мм до 3,5 мм. Средние форсунки имеют типоразмеры от ОН-547-01 до ОН-547-06; при давлении мазута 2,0 МПа их пропускная способность изменяется от 400 до 2000 кг/ч, при давлении 3,5 МПа - от 500 до 2000 кг/ч, а диаметр сопла изменяется от 2,5 мм до 7,0 мм. Форсунки этих типов изготавливаются с длиной ствола от 200 до 4000 мм. Вязкость топлива для них должна находиться в пределах 3...4° ВУ, фильтрация топлива производится через сетку 0,5x0,5 мм для

форсунок с диаметром сопла до 2,5 мм и через 1 x 1 мм с диаметром сопла более 2,5 мм.

Для котлов средней и большой мощности завод "Ильмарине" выпускает механические форсунки по ОСТ 108.836.01-80. В этих форсунках сопло и камера завихривания выполнены одной деталью (рис. 1.37).

Форсунки имеют одиннадцать типоразмеров с пропускной способностью от 750 до 9000 кг/ч при давлении топлива 3,5 МПа и вязкости не более 2,5 °ВУ; топливо пропускается через фильтр 0,5 x 0,5 мм. Пример обозначения: ФМ750/500 (форсунка механическая, пропускная способность 750 кг/ч при давлении топлива 3,5 МПа, длина ствола 500 мм). Основные параметры форсунок приведены в таблице 1.7.

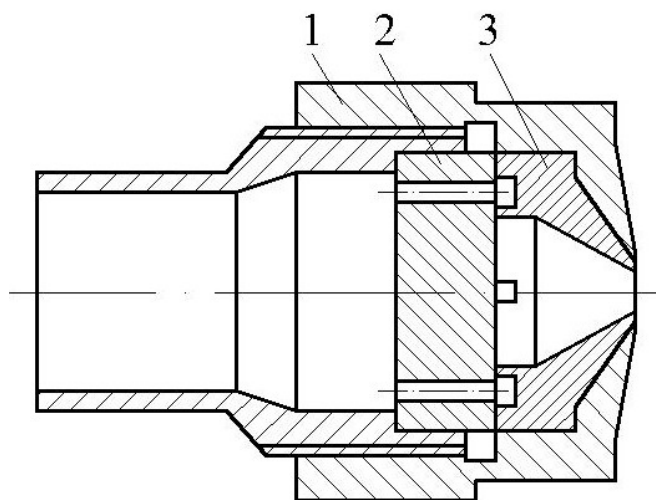


Рис. 1.37. Головка механической форсунки по ОСТ 108.836.01-80:  
1 - накидная гайка; 2 - распределительная шайба; 3 – завихритель

Диапазон регулирования механических форсунок по производительности 70...100% при давлении топлива 2,0 МПа и 55...100% при 3,5 МПа; предназначены они в основном для котлов, работающих в базовом режиме. При снижении производительности ниже допустимой производится количественное регулирование путем отключения ряда горелок.

В котлах большой мощности используются регулируемые механические форсунки: двухконтурная с обратным сливом (рис. 1.38) и двухступенчатая ВТИ-БЭРН (рис. 1.39).

В форсунке с обратным сливом топливо из топливопровода 1 поступает по двум периферийным каналам в распределительно-завихрывающую шайбу 3, откуда подается в сопловой насадок 4. При снижении нагрузки часть топлива отводится через центральный канал в сливную линию через сливной регулирующий клапан (на рис. 1.38 не показан) на всас мазутных насосов.

В форсунке ВТИ-БЭРН установлено два топливных завихрителя: низкого 4 и высокого 5 давления. При работе на сниженных нагрузках топливо поступает к распределительной шайбе 3 через центральный канал, при этом работает завихритель 4. При увеличении нагрузки и, соответственно, росте давления то-

плива срабатывает пружинный клапан (на рис. 1.39 не показан) на топливопроводе 1 высокого давления и топливо поступает также к завихрителю 5 высокого давления, с этого момента в форсунке работают обе ступени.

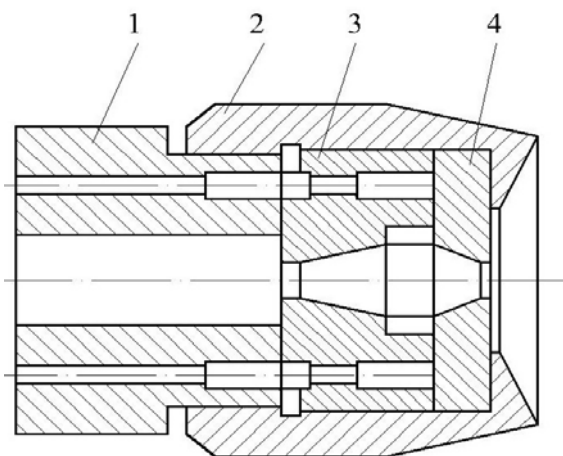


Рис. 1.38. Головка механической двухконтурной форсунки с обратным сливом: 1-топливопровод; 2-накидная головка; 3-распределительно-завихри-вающая шайба; 4-сопловый насадок

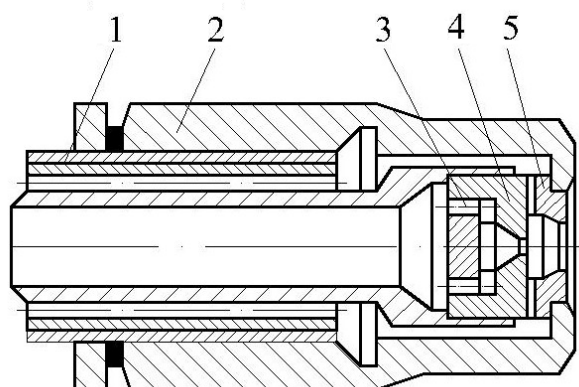


Рис. 1.39. Механическая двухступенчатая форсунка ВТИ-БЭРН: 1-топливопровод высокого давления; 2-накидная гайка; 3-распределительная шайба; 4-завихритель низкого давления; 5-завихритель высокого давления

Паро- и пневмомеханические форсунки. В этих форсунках за топливным завихрителем (по ходу топлива) установлен паровой или воздушный завихритель. На нагрузках 100...70% пар (воздух) в форсунку не подается, и она работает как механическая. На грузках ниже 70% в паровой (воздушный) завихритель подается распыливающий агент для вторичного дробления топлива с постоянным, независимым от нагрузки, давлением. С ростом давления топлива расход распыливающего агента будет сокращаться и прекратиться совсем, когда давление топлива станет равно давлению распыливающего агента. Зависимости качества распыливания топлива от суммарной энергии  $\epsilon_{\text{тр}}$  (см.(1.9)) топлива и распылителя от давления топлива при постоянном давлении распылителя рассмотрены ранее (см. рис. 1.16 и 1.17).

Для котлов малой производительности применяют паромеханические форсунки, используемые в горелках ГМГМ и ГМГБ (рис. 1.8). Форсунка двухсопловая с внешним взаимодействием потоков топлива и распыливающего агента. Завод «Ильмарине» выпускает четыре типоразмера этих форсунок: пропускной способности по мазуту 165 кг/ч (при давлении топлива 1,6 МПа), 220, 435 и 530 кг/ч (при давлении топлива 2,0 МПа). Топливные 3 и паровые 4 завихрители для всех типоразмеров - трехканальные, давление распыливающего пара 0,1...0,2 МПа. Диапазон регулирования форсунок по производительности 20...100%.

В горелках котлов средней и большой производительности используют паромеханические форсунки ЦКТИ-ВТИ, изготовленные по ОСТ 108.836.03-80 (рис. 1.40).

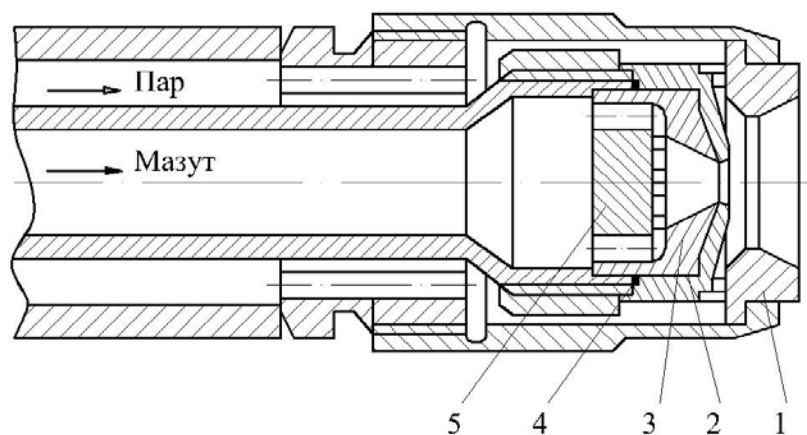


Рис. 1.40. Нормализованная паромеханическая форсунка по ОСТ 108.836.03-80 (двухкамерная с внутренним взаимодействием потоков):  
 1- сопло паровое; 2 - гайка; 3 - завихритель топливный;  
 4 - прокладка; 5 - шайба распределительная

Форсунки двухкамерные с внутренним взаимодействием потоков топлива и пара, выпускаются они одиннадцати типоразмеров с пропускной способностью топлива от 760 до 9000 кг/ч при давлении топлива 3,5 МПа. Пар на вторичное дробление пленки и крупных капель топлива 0,4 МПа поступает к топливу между накидной гайкой 2 и соплом 1, имеющим восемь наклонных шлицевых канавок для закрутки пара. Основные параметры форсунок приведены в табл. 1.7.

Также для котлов средней и большой мощности применяются паромеханические двухкамерные с внутренним взаимодействием потоков форсунки типа «Титан-М» (рис. 1.41).

Топливо подается по центральному стволу, пар на вторичное дробление - по периферии через наклонные шлицевые канавки сопла 7 для закручивания распыливающего агента. Эти форсунки выпускаются десяти типоразмеров с пропускной способностью от 1000 до 12000 кг/ч при давлении топлива 3,5 МПа; давление пара на распыливание - до 0,8 МПа, расход пара при этом давлении от 40 до 450 кг/ч в зависимости от типоразмера форсунки. Диапазон регулирования форсунок - от 24 до 100%.

Наиболее ответственной и трудоемкой в изготовлении деталью механических и паромеханических форсунок является топливный завихритель, поэтому он изготавливается из материалов, обладающих высокой твердостью и износостойкостью: сталь ХВГ, ГОСТ 5950-73, спеченный твердый сплав, сталь 30Х13, ГОСТ 3532-72, 38ХМЮА, ГОСТ 4543-71. Срок службы топливных завихрителей, изготовленных из этих материалов, около 1000 ч.

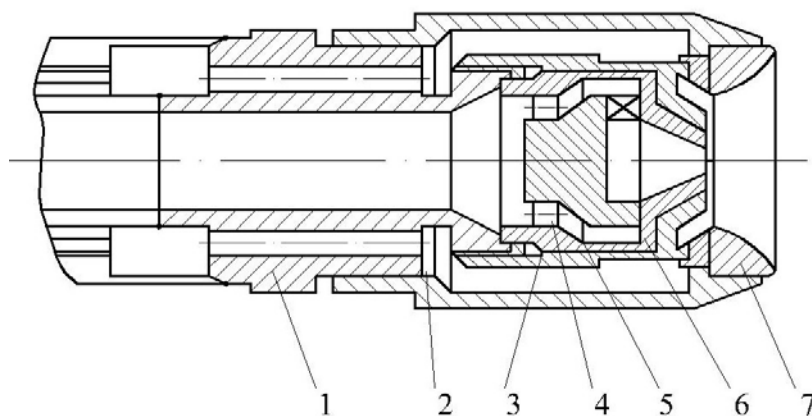


Рис. 1.41. Головка паромеханической форсунки «Титан-М»:  
1 - распределитель; 2 - паровая гайка; 3 - мазутная гайка, 4 - фильтр;  
5 - завихритель мазута; 6 - мазутное сопло; 7 - паровой распылитель

Паровые и пневматические форсунки. Взаимодействие потоков топлива и распыливающего агента в паровых и пневматических форсунках происходит как внутри форсунки, так и вне ее. Завод «Ильмарине» выпускает паровые форсунки по ОСТ 108.836.04-80 внутренним взаимодействием потоков (рис. 1.42).

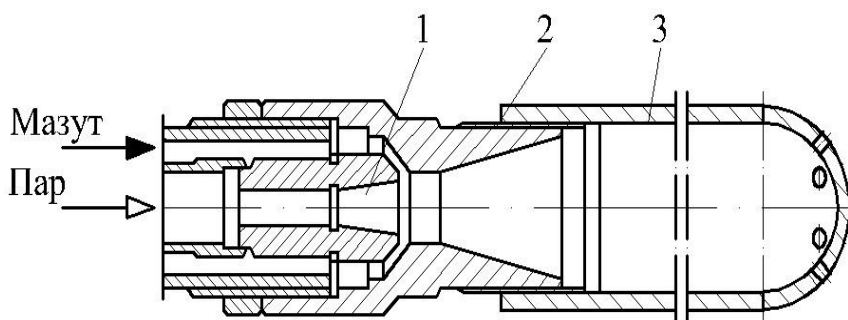


Рис. 1.42. Головка нормализованной паровой форсунки по ОСТ 108.836.04-80:  
1 – сопло; 2 - диффузор; 3 – насадок

Пар поступает по центральному стволу через топливное сопло в форме сопла Лаваля, топливо поступает по нормали к потоку пара через кольцевой зазор между соплом и распыливающей головкой (диффузором). Далее топливно-паровая смесь движется в расширяющемся канале диффузора. Многосопловой насадок установлен для уменьшения длины факела. Без насадка давление топлива 0,05 МПа, а угол распыливания 20...30°. Завод-изготовитель выпускает шесть типоразмеров форсунок с длиной ствола от 500 до 5000 мм через 500 мм. Пример обозначения по ОСТ: ФП 1225/2000 (максимальная производительность 1225 кг/ч, длина ствола 2000 мм).

Параметры форсунок приведены в табл. 1.7. Опыт эксплуатации этих форсунок показывает, что наилучшее распыливание достигается при давлении пара не ниже 1,2...1,3 МПа.

## Основные параметры нормализованных форсунок

<i>Величина</i>	<i>Форсунки механические ОСТ 108.836.01-80</i>	<i>Форсунки паромеханические ОСТ 108.836.03-80</i>	<i>Форсунки паровые ОСТ 08.836.04-80</i>
Пропускная способность форсунки на номинальном режиме с допустимым отклонением не более 2%, кг/ч	750...9000	750...9000	125...1800
Давление мазута (на номинальном режиме) перед форсункой, МПа	3,5	3,5	0,4...0,5
Вязкость мазута, мм <sup>2</sup> /с, не более	16	16	60
Допустимый размер механических включений после фильтрации, мм	0,5	0,5	0,5
Коэффициент рабочего регулирования	1,5	10	3
Номинальный конусной угол распыливания, градус	85...90	90	90...95
Относительный расход пара при давлении распыливающего пара 0,4 МПа, кг/кг, не более	-	0,02	0,4
Давление распыливающего пара, МПа	-	0,4	0,4...2,5
Температура распыливающего пара, °С	-	120...230	120...230

В струйных форсунках ЦКТИ с внутренним взаимодействием потоков (рис. 1.7) пар проходит через узкие сопла (1...3 мм) парового коллектора и продувает пленку топлива, набегающую на паровую струю по нормали. Топливо-паровая смесь проходит через сопла распылителя большего размера (2...6 мм),



дополнительно эжектируя топливо из пленки. Количество пар сопел от 3 до 8, соответственно производительность форсунок от 150 до 3450 кг/ч. Оптимальное давление топлива 0,2...0,25 МПа, пара или воздуха 0,40...0,45 МПа. Нагрузка форсунки регулируется давлением топлива от 0,03...0,04 МПа до 1,0...1,5 МПа. Расход распылителя на номинальной нагрузке 0,06...1,0 кг/кг. В качестве распыливающего агента можно использовать пар (насыщенный или перегретый) или воздух.

На котлах производительностью 170 т/ч (ТП-170) и 220 т/ч (БКЗ-220) эксплуатируются плоскофакельные форсунки ЦКТИ (рис. 1.43).

Точки пересечения осей паровых и топливных сопел располагаются на оси форсунки. При соударении паровых и топливных струй образуется расплюснутый топливно-паровой факел в форме эллипса. Давление распыливающего пара 0,4 МПа, давление топлива 0,4 МПа. Производительность форсунки 0,7; 1,3 и 2,0 т/ч при размерах топливных сопел 3, 4 и 5 мм соответственно. Удельный расход пара 0,12 кг/кг. Угол раскрытия факела (в плоскости, перпендикулярной к плоскости сопел) составляет 60°.

Основным недостатком использования пара в качестве распыливающего агента является усиление низкотемпературной коррозии и, как следствие, необходимость повышения температуры уходящих газов, при этом растет  $q_2$ . При использовании для распыления топлива сжатого воздуха этот недостаток устраняется. Этот же воздух участвует в первичной подготовке топливовоздушной смеси.

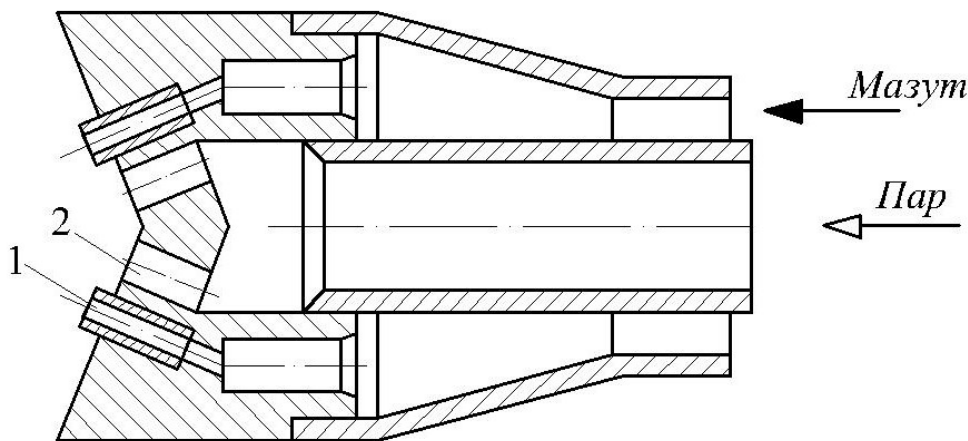


Рис. 1.43. Плоскофакельная паровая форсунка ЦКТИ:  
1 - топливное сопло; 2 - паровое сопло

По давлению воздуха различают форсунки низконапорные ( $p_v = 0,002...0,008$  МПа), средненапорные ( $p_v = 0,02...0,1$  МПа) и высоконапорные ( $p_v = 0,2 ... 0,8$  МПа). Для достижения заданной дисперсности распыливания необходимо подать определенное количество распыливающего агента, которое зависит от его давления и плотности. При высоком давлении воздуха могут быть использованы без каких-либо изменений паровые форсунки. Так, при работе паровой форсунки на сжатом воздухе удельный расход воздуха на распы-

ливание топлива составляет 0,8 кг/кг. Низко- и средненапорные пневматические форсунки значительно отличаются от паровых геометрическими размерами вследствие больших объемов воздуха, подаваемого для распыления топлива. Так в низконапорных форсунках для распыления подается от 25 до 100% воздуха, необходимого для сгорания топлива.

Форсунки с распыливающим агентом обладают хорошей регулируемостью, что объясняется возможностью изменения параметров обоих потоков.

Ротационные форсунки. Наиболее распространены ротационные форсунки с вращающимся стаканом (рис. 1.9). Наружный диаметр стакана имеет размеры 150...200 мм. Расширение внутренней полости  $5...6^\circ$ , среза к наружной образующей -  $30^\circ$ , частота вращения стакана  $(4...5) \cdot 10^3$  об/мин. Топливо подается по топливопроводу внутри вала и гайке-питателю, оттуда на стенку стакана и далее в топку. Пленка топлива срывается со стакана, под углом  $90^\circ$  к оси форсунки и дробится на капли под действием центробежных сил. Для дополнительного дробления пленки топлива и придания формы факелу к форсунке подводится первичный воздух от автономного вентилятора (10...20% общего воздуха, необходимого для горения). Часть первичного воздуха поступает в полость стакана через четыре отверстия в его дне, а часть - непосредственно на пленку топлива через аксиальный завихритель. В диапазоне нагрузок 30...100% давление первичного воздуха остается неизменным, при более низких нагрузках давление первичного воздуха снижается во избежание срыва факела.

Преимущества ротационных форсунок: отсутствие сопел как дозирующих элементов, насосов высокого давления и фильтров тонкой очистки; высокая (до  $15^\circ$  ВУ) вязкость топлива; давление топлива равно сопротивлению топливопровода. Недостатки - при неравномерной подаче топлива на стенку стакана нарушается симметрия факела, то же самое наблюдается при «биении» стакана. С ростом производительности эти недостатки усугубляются, поэтому мощность ротационных форсунок не превышает 35 МВт, и применяются они в маломощных установках. Используются на производстве горелки с ротационными форсунками Р-1-150, изготавливаемые на Таллинском заводе «Террас» и газомазутные горелочные устройства с форсунками (см. рис. 1.9), изготавливаемыми на заводе «Ильмарине» [6].

## 2. СЖИГАНИЕ ГАЗООБРАЗНОГО ТОПЛИВА

### 2.1. Подготовка газообразного топлива к сжиганию

Горючий газ (природный или искусственный) по своему фазовому состоянию наиболее подготовлен к сжиганию.

Доставляется газ к потребителю либо в сжиженном состоянии водным, железнодорожным или автомобильным транспортом, либо в газообразном по трубопроводу. Последний способ транспортировки является самым дешевым. Для увеличения количества перекачиваемого по трубопроводу газа требуется

повышение его давления. При этом требуемое давление газа перед горелочными устройствами может быть меньше, чем в транспортном газопроводе. Для приведения давления газа к паспортным значениям горелочных устройств применяют редуцирующие устройства: газорегуляторные пункты (ГРП) или газорегуляторные установки (ГРУ).

Значение температуры газа перед горелочным устройством также определено паспортом последнего. При подземной прокладке транспортных газопроводов температура газа постоянна, что удобно при автоматическом регулировании процесса горения. При наземной прокладке газопроводов температура газа имеет сезонные колебания, поэтому приходится прибегать либо к сезонной настройке регуляторов горения, либо к ручному регулированию горения с использованием сезонных режимных графиков.

Перед подачей газа в транспортные магистрали он осушается до значения, примерно,  $10 \text{ г H}_2\text{O}$  в  $1 \text{ м}^3$  газа. Водяные пары, содержащиеся в газе, при определенных условиях способствуют образованию гидратов, а при конденсации их и низких температурах образуются ледяные пробки. Поэтому перед сжиганием газов иногда требуется организовать их сушку или использовать регуляторные станции для сепарации влаги.

Большинство природных газов не имеют вредных примесей, во многих попутных и синтетических (доменный, коксовый и др.) их очень мало. Однако даже при незначительных концентрациях некоторые примеси весьма токсичны и коррозионноактивны. К этим примесям относятся сероводород  $\text{H}_2\text{S}$  и сероуглерод  $\text{CS}_2$ . Удалять их можно путем промывки газа водой или фильтрованием газа в известковых или угольных фильтрах. Помимо сернистых соединений в горючем газе содержатся цианиды, в основном синильная кислота  $\text{HCN}$ , образующаяся из топливного азота. При сгорании  $\text{HCN}$  азот, содержащийся в кислоте, окисляется с образованием токсичных оксидов  $\text{NO}_x$ . Кроме того, наличие  $\text{HCN}$  приводит к сильной коррозии железа, меди, цинка, олова и их сплавов. Для очистки от  $\text{HCN}$  горючий газ пропускается через специальные фильтры, заполненные оксидами железа.

Если на предприятии используется низко- или высококалорийный газ, не соответствующий по теплоте сгорания установленным горелочным устройствам, то для подготовки газа необходимого качества производится смешение газов с различной теплотой сгорания.

Возможность использования установленных горелочных устройств для сжигания любого газа оценивается предварительно. В отечественной практике возможность взаимозаменяемости горючих газов в основном определяется расчетом с последующей реконструкцией и стендовыми исследованиями опытных образцов горелок. Это трудоемкий способ. В мировой практике оценка возможной взаимозаменяемости газов производится следующими способами:

- 1) экспериментально, путем сжигания газа в опытных эталонных горелках (Отто, Сако-Шака, Газ де Франс и др.), сравнивают характеристики пламени различных сжигаемых газов и оценивают влияние свойств этих газов на горение;
- 2) аналитически, путем определения и сопоставления шести критериев взаимозаменяемости: теплопроизводительности (число Воббе); уровней рабочих дав-

лений; пределов отрыва пламени; пределов проскока пламени; образования продуктов химического и механического недожогов. Иногда число Воббе включается в руководящие указания как самостоятельный показатель взаимозаменяемости газов. Определяют число Воббе из выражения:

$$W_H = \frac{Q_H^p}{\sqrt{d_{\Gamma}}}; \quad \left( \bar{d}_{\Gamma} = \frac{c_T}{c_B} \right). \quad (2.1)$$

Различают высшее  $W_B$  и низшее  $W_H$  число Воббе в зависимости от того, какая, высшая или низшая, теплота сгорания газа принята при его вычислении. По физическому смыслу число Воббе - это удельная теплопроизводительность горелки постоянных конструктивных размеров ( $f_{\mu} = \text{const}$ ) при постоянном режиме эксплуатации ( $\frac{gc_T}{c_1} = \text{const}$ ). С помощью числа Воббе удобно контроли-

ровать комплексное влияние теплоты сгорания и плотности газа на теплопроизводительность горелки (Приложение 1);

3) графически, при помощи диаграммы заменяемости Дельбурга, построенной для большого количества уже исследованных горючих газов.

С целью своевременного обнаружения утечки газа его подвергают одоризации, т.е. придают ему резкий специфический запах. Газы одорируют после их очистки и осушки перед поступлением в магистральный газопровод или городскую газовую сеть в одоризационных установках. Наиболее распространенный одорант - этилмеркаптан ( $C_2H_5SH$ ), который содержит до 50% серы. Концентрация этилмеркаптана составляет  $16 \cdot 10^{-3}$  г. на  $1 \text{ м}^3$  природного газа. При такой концентрации запах газа в помещении будет хорошо ощутим при количестве его 1% об. Это количество газа в смеси с воздухом взрывобезопасно, т.к. нижний предел взрываемости - 5% природного газа в смеси с воздухом.

*Давление газа.* При сжигании газообразного топлива его давление может быть низкое (меньше 0,005 МПа), среднее (0,005...0,3 МПа) или высокое (0,3...1,2 МПа). Выбор давления газа и воздуха перед горелочным устройством определяет оптимальность распределения топлива в окислителе и качество смесеобразования. Вообще говоря, с целью уменьшения расхода энергии на собственные нужды следует стремиться к минимально возможным давлениям. Однако для уменьшения габаритов горелки и улучшения процессов смесеобразования и сжигания следует увеличивать давление газа. На практике уровень давлений горючего газа ограничен давлением газа в транспортном газопроводе.

При переводе первых котлов на газ они либо подключались к газовым регуляторным пунктам бытового назначения, либо к собственным ГРП на такое же давление ( $p_{\Gamma} = 0,002$  МПа). На такое же давление проектировались горелки. С ростом мощности котлов, работающих на газе, давление газа повышали. В настоящее время топливоиспользующие установки работают на газе низкого и среднего давлений (промышленные и отопительные котельные) и среднего

(котлы ТЭС). Горелочные устройства спроектированы на соответствующее давление. Обеспечивается постоянное рабочее давление при помощи ГРУ или ГРП.

ГРУ монтируют непосредственно в помещениях, где расположены топливоиспользующие установки. ГРП размещают вне помещения в отдельном здании или в пристройке, в шкафах, закрепленных на стене снаружи помещения или на отдельной опоре, на несгораемой крыше помещения (например, здании котельной). Кроме поддержания давления газа в ГРУ и ГРП производятся: очистка газа и снижение его давления, контроль за входным и выходным давлением и температурой газа; учет расхода; предохранение от возможного повышения или понижения давления сверх допустимых значений. Основное оборудование ГРУ и ГРП: регулятор давления; предохранительный запорный клапан (ПЗК); предохранительный сбросной клапан (ПСК); фильтр; контрольно-измерительные приборы (КИП); импульсные трубопроводы, по которым подаются импульсы давления газа к регулятору, ПЗК, ПСК и КИП; сбросные трубопроводы, по которым газ отводится в атмосферу от ПСК, продувочных линий и т.п.; запорные устройства (задвижки, краны); обводной газопровод (байпас) для подачи газа к потребителю при ремонте основного оборудования ГРП (ГРУ).

ГРП (ГРУ) могут иметь две и более линий с установкой на них всего комплекта перечисленного оборудования. Прокладка всех газопроводов в пределах ГРП и до котлов выполняется наземной. Подвод газа от ГРП к коллектору котельного отделения (вне здания) производится по одной нитке. Принципиальная схема ГРП (ГРУ) с учетом расхода газа при помощи устройства «диафрагма-дифманометр» представлена на рис. 2.1.

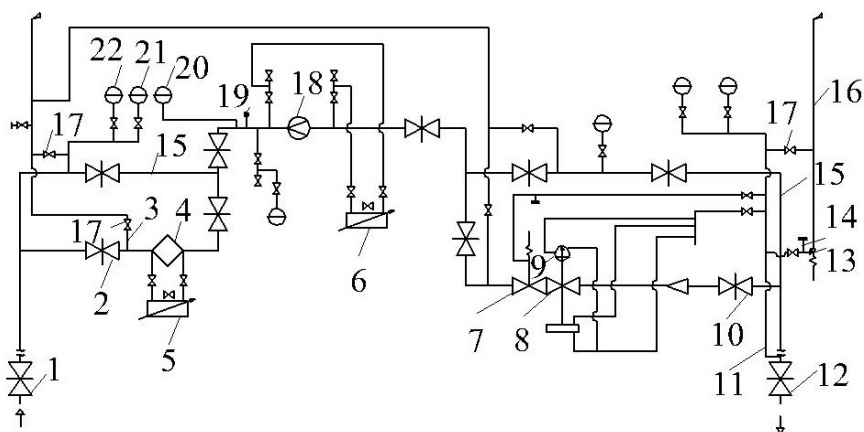


Рис. 2.1. Принципиальная схема ГРП (ГРУ):

1, 12 - запорные устройства на входе и выходе; 2, 10 - то же перед и за ГРП; 3 - продувочный трубопровод; 4 - фильтр; 5 - дифманометр; 6 - дифманометр-расходомер; 7 - ПЗК; 8 - регулятор давления; 9 - пилот; 11 - импульсная трубка; 13 - ПСУ; 14 - штуцер для настройки ПСУ; 15 - байпас; 16 - сбросной трубопровод; 17 - кран продувочного трубопровода; 18 - камерная диафрагма; 19 - технический термометр; 20, 21 - самопишущие термометр и манометр; 22 - показывающий манометр

Газовое хозяйство. На ТЭС природный газ поступает по одному магистральному газопроводу диаметром до 2м. Газохранилище для природного газа на ТЭС не сооружают. На рис. 2.2. приведена схема снабжения ТЭС природным газом.

Газ после газорегуляторной станции (ГРП) поступает в два общих газопровода (на рисунке показан один из них), каждый из которых обеспечивает 70% максимального расхода. К котельным установкам газ подводится газопроводами, ответвляющимися от общего газопровода. На линии подачи газа к котельной установке установлены устройства для регулирования и измерения расхода газа. Газовые линии продувают из тупиковых участков через свечи, выведенные за пределы здания в места, недоступные для пребывания людей. Через эти свечи удаляют воздух перед растопкой котлов и газ при остановке котлов. Газопроводы устанавливают с уклоном для удаления через конденсатоотводчики скапливающейся влаги.

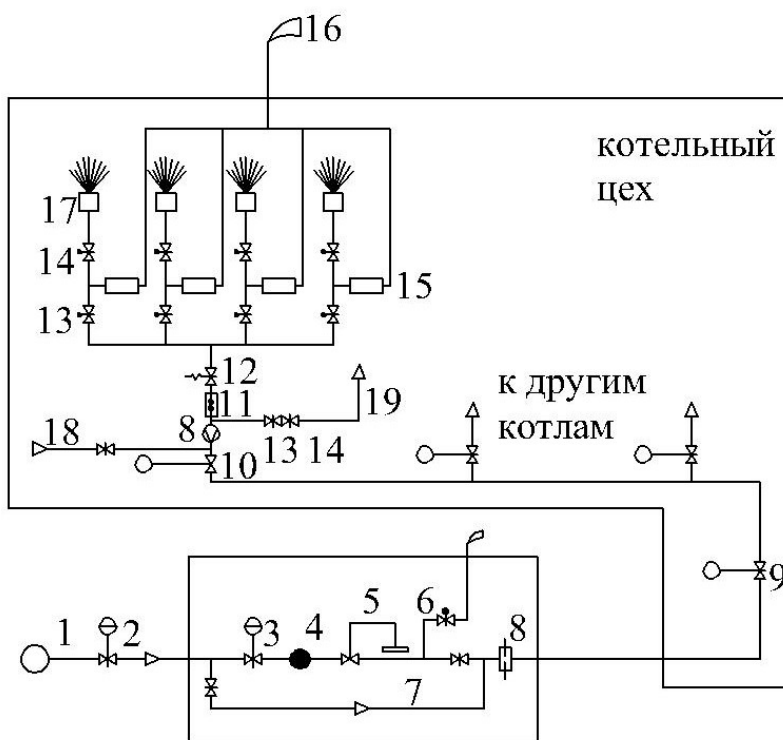


Рис. 2.2. Схема газоснабжения ТЭС:

1 - газовая магистраль; 2,3,9,10 - газовые задвижки с электроприводом; 4 - фильтр; 5 - регулятор давления; 6 - предохранительный клапан; 7 - байпасная линия; 8 - измеритель расхода газа; 11 - быстродействующий клапан; 12 - заслонка регулятора расхода газа- 13 - газовая задвижка запорная; 14 - регулирующая газовая задвижка; 15 - пробковый кран; 16 - свеча; 17 - газовая горелка; 18 - сжатый воздух для продувки газопроводов; 19 - газ к газовому запальнику

Схема газоснабжения котельной приведена на рис. 2.3.

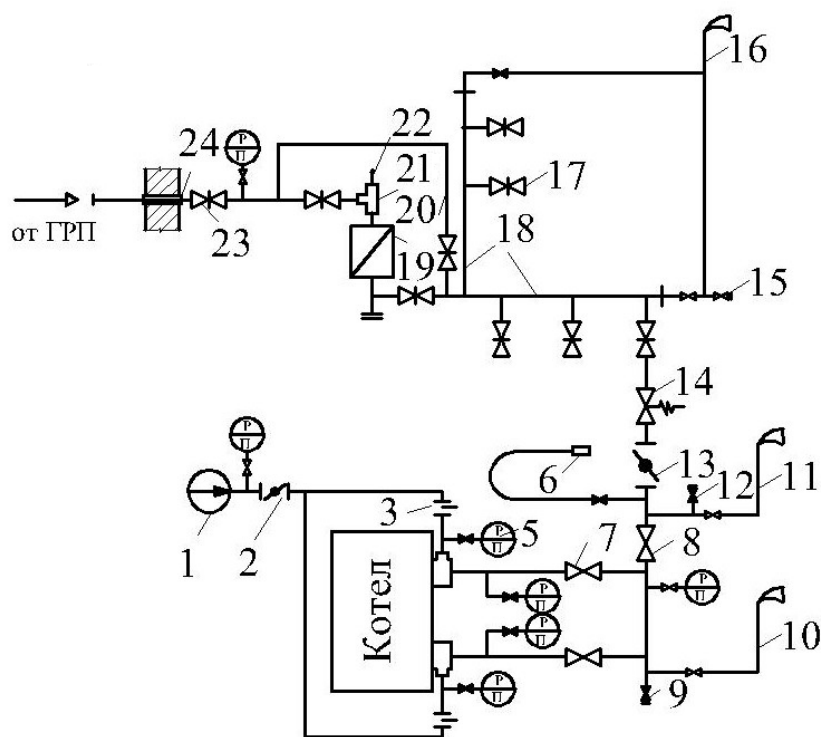


Рис. 2.3. Схема газопроводов котельной и обвязочных газопроводов котельной установки:

1 - дутьевой вентилятор; 2, 13 - поворотные заслонки; 3 - шибер; 4 - горелочное устройство; 5 - манометр показывающий; 6 - переносный запальник; 7 - рабочий кран; 8 - контрольный кран; 9 - штуцер с пробкой для проверки плотности кранов; 10 - трубопровод безопасности; 11, 16 - продувочные газопроводы; 12, 15 - краны для отбора проб на качество продувки; 14 - клапан-отсекатель; 17 - отключающее устройство на ответвлении газопровода к котельной установке; 18 - газовый коллектор котельной; 19 - газовый ротационный счетчик; 20 - байпас счетчика; 21 - фильтр-ревизия; 22 - технический термометр; 23 - общая отключающая задвижка; 24 - футляр ввода газопровода в здание котельной

Она применяется для газопроводов низкого и среднего давления, но после ГРП. Если в котельной предусмотрена установка ГРУ, то последняя монтируется в схему между задвижкой 23 и измерителем расхода 20. На этом же рисунке показана упрощенная схема обвязки газопроводами среднего давления котельной установки. В качестве отключающих устройств здесь использованы краны. Практика показывает, что по надежности отключения краны эффективнее задвижек, т.к. неплотности задвижек приводят к утечкам газа в топку, причем обнаружить их без специальных приборов невозможно, утечки же из кранов попадают в помещение котельной, и их легко обнаружить по запаху. В предложенной схеме обвязки перед каждой горелкой установлено по одному рабочему крану, а контрольный кран и трубопровод безопасности предназначены для котельной установки в целом.

Следует отметить, что схемы обвязочных газопроводов имеют много вариантов и зависят от типа горелочных устройств, вида применяемой автоматики и количества зон регулирования, типа отключающих устройств и давления

газа. Эксплуатация газового хозяйства ведется на основе «Правил безопасности в газовом хозяйстве» [9].

Смесеобразование - перемешивание первичного воздуха с горючим газом с целью получения смеси, способной воспламениться и гореть в топочной камере. Интенсивность и качество (равномерность распределения топлива в окислителе) смесеобразования являются основополагающими факторами надежного и экономичного его сжигания. Смесеобразование зависит от типа и конструктивных особенностей горелочных устройств, которые с этой точки зрения можно классифицировать следующим образом: 1) газогорелочные устройства с предварительным смесеобразованием; 2) газогорелочные устройства диффузионного типа (с отдельным вводом горючего газа и воздуха в зону горения); 3) газогорелочные устройства комбинированного смешения, сочетающие в себе элементы первого и второго типов. В соответствии с приведенной классификацией смесеобразование производится следующим образом: 1) начинается и заканчивается в горелочном устройстве, а в топочную камеру подается окончательно подготовленная для сжигания однородная смесь; 2) происходит целиком в топочной камере и смесь сгорает в диффузионном факеле; 3) начинается в горелочном устройстве и заканчивается в топочной камере. Для топочной техники наиболее применимыми являются принципы подготовки смеси второго и третьего типов. При этом внедрение газа в воздушный поток может начинаться уже в горелочном устройстве, а перемешивание объемов газа и воздуха начинается на срезе горелочного устройства и продолжается в горящем факеле.

Распределение горючего газа в воздушном потоке может осуществляться струйным и центробежным способом. Наибольшее распространение получили струйные распределители. В этом случае газ вводится в воздушный поток через одну, чаще через несколько трубок или отверстий спутно воздушному потоку или под углом к нему. Для улучшения качества смесеобразования при спутной подаче газа и воздуха их потоки резко турбулизируются. Введение газа под углом к воздушному потоку позволяет получить нужное качество перемешивания при меньших скоростях газа. Раздача горючего газа в воздушный поток тонкими струями наиболее удобна для горелок котлов при сжигании природного газа, т.к. в этом случае расход газа значительно меньше расхода воздуха (на 1 м<sup>3</sup> природного газа расходуется около 10 м<sup>3</sup> воздуха). При этом скорость воздуха равна 20...40 м/с, а газа - до 100 м/с.

Максимальная глубина внедрения газовых струй в воздушный поток выбирается с учетом экономичности сжигания и исключения перегрева и обгорания элементов горелки и амбразуры. Качество смесеобразования обеспечивается равномерностью раздачи газа через трубки (отверстия). Для этого глубина проникновения, газовых струй должна быть различной, как это показано на рис. 2.4, а распределение газа по слоям должно соответствовать расходу воздуха в этих слоях.



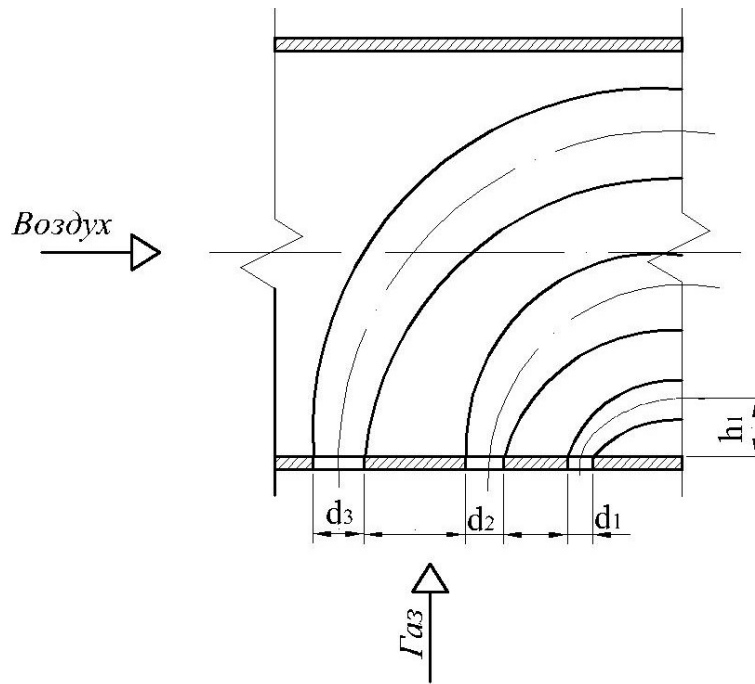


Рис. 2.4. Схема развития газовых струй в воздушном потоке

При расчете глубины внедрения газовых струй в воздушный поток в зависимости от типа горелочного устройства рассматриваются следующие случаи.

1. Струя газа проникает в поперечно движущийся неограниченный плоскопараллельный поток:

$$\frac{h}{d_{\text{ЭКВ}}} = k_s \frac{w_{\text{ТО}}}{\bar{w}_B} \sqrt{\frac{c_B}{c_T}} \sin \alpha, \quad (2.2)$$

где  $h$  - глубина внедрения, расстояние от оси струи газа, движущейся параллельно потоку, до плоскости, в которой установлено сопло ( $h_1$  на рис. 2.4);  $d_{\text{ЭКВ}}$  -

эквивалентный диаметр сопла, ( $d_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{\frac{4F}{p}}$ ), для круглого сопла  $d_{\text{ЭКВ}} = d$ ;

$k_s$  - коэффициент пропорциональности, он зависит от относительного шага между отверстиями  $s/d$  (для  $s/d = 5,0$  -  $k_s = 1,6$ ;  $s/d = 10$  -  $k_s = 1,75$ ;  $s/d = 15$  -  $k_s = 1,9$ ;  $s/d = 20$  -  $k_s = 2,0$ );  $w_{\text{ТО}}$  - скорость газа на выходе из сопла;  $\bar{w}_B$  - средняя скорость поперечного потока воздуха;  $\rho_B$  и  $\rho_T$  - плотности соответственно воздуха и газа;  $\alpha$  - угол атаки струи.

2. Струя газа проникает в поперечно движущийся ограниченный плоскопараллельный поток:

$$\frac{h}{d_{\text{ЭКВ}}} = \frac{k_S}{e} \frac{w_{\text{ТО}}}{\bar{w}_B} \sqrt{\frac{c_B}{c_T}} \sin \alpha, \quad (2.3)$$

где  $\varepsilon$  - относительное увеличение результирующей скорости в канале (скорости смеси),  $\varepsilon = \frac{c_B V_B + c_T V_T}{c_{\text{см}} V_B}$ ;  $\rho_{\text{см}}$  - плотность смеси;  $V_B$ ,  $V_T$  - объемный секундный расход соответственно воздуха и газа.

3. Струя газа проникает в объем закрученного потока воздуха:

$$\frac{h}{d_{\text{ЭКВ}}} = \frac{k_S}{e} \frac{w_{\text{ТО}}}{\bar{w}_1} \sqrt{\frac{c_B}{c_T}} \sin \alpha, \quad (2.4)$$

где  $w_1$  - абсолютное значение средней интегральной скорости воздуха в зоне развития струи,  $w_1 = \int_0^l w_i dR$ ;  $l$  - глубина проникновения струи по ее верхней кромке ( $l = 1,375 h$ );  $w_i$  - текущее значение действительной скорости воздуха;  $R$  - радиус цилиндрического канала.

Выполняя в газовой камере отверстия разных диаметров, получаем различную глубину проникновения, тем большую, чем больше диаметр отверстия истечения газа. Отношение диаметра сопла (отверстия) к глубине проникновения является величиной постоянной для всех струй. При  $\alpha = 90^\circ$   $d/h = 0,75$ , а глубина проникновения струи является максимальной. Из формул (2.2)...(2.4) видно, что при уменьшении расхода газа (уменьшении  $w_{\text{ТО}}$ ) дальность топливных струй уменьшается, ухудшая качество смесеобразования  $\bar{x} \rightarrow 1$ , см. (2.7) и пояснения этого выражения), что способствует устойчивому горению при переменных коэффициентах избытка воздуха  $\alpha$  по сравнению с гомогенной смесью ( $\bar{x} = 0$ ).

Раздача газа в воздушный поток производится либо от периферии потока к его оси, либо от оси потока к периферии (центральный подвод газа), как это показано, например, на рис. 2.5.

Относительный шаг между газораздающими отверстиями определяется из выражений:

1) при периферийной подаче газа

$$\frac{S}{d} = \frac{p}{md} (R - 1); \quad (2.5)$$

2) при центральной подаче газа

$$\frac{S}{d} = \frac{p}{md} (1 + r_o) \quad (2.6)$$

где  $m$  - число струй;  $d$  - диаметр отверстия для истечения газа;  $r_o$  - наружный радиус центральной газовой трубы.

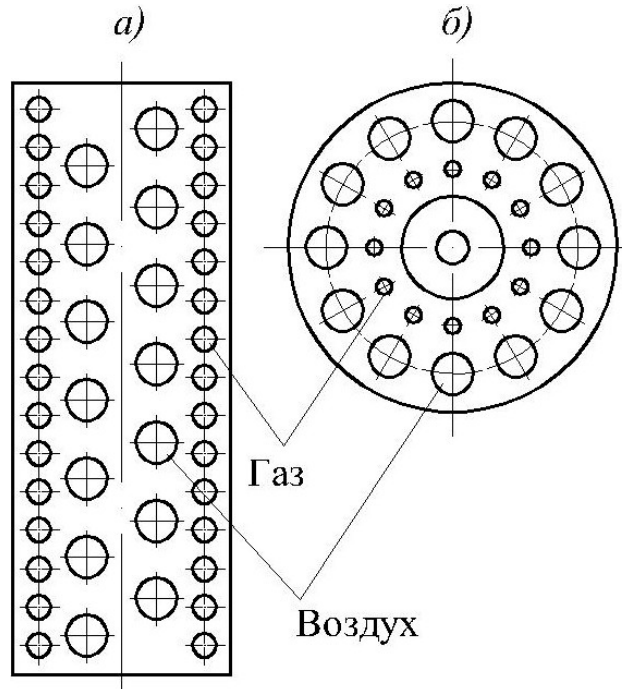


Рис. 2.5. Распределение газа и воздуха:  
 а) - в щелевой горелке при периферийном подводе газа;  
 б) - в круглой горелке при центральном подводе газа.

Наилучшие условия для смешения газа с воздухом обеспечиваются в случаях, когда газовая струя попадает в область максимальных скоростей воздушного потока.

На качество смесеобразования помимо диаметра газораздающих отверстий и глубины проникновения газовых струй оказывает влияние также количество газовых струй. При малом числе струй процесс смешения ухудшается из-за неравномерного распределения газа в воздушном потоке, при слишком большом их числе происходит слияние отдельных газовых струй, что также ухудшает процесс смешения. Оптимальное число газовых струй определяется коэффициентом  $\Psi$  [8]. Для горелок с периферийной подачей газа  $\Psi = 0,12 \frac{hm}{R-h}$ ; для горелок с центральной подачей газа  $\Psi = 0,12 \frac{hm}{h-r_o}$ . Оптимальным

значением  $\Psi$ , обеспечивающим лучшее смесеобразование и минимальную длину факела является  $\Psi = 0,7...0,8$ .

Качество смесеобразования обеспечивается не только начальным распределением газа в воздушном потоке, но и интенсивностью массопереноса. При турбулентном движении потоков интенсивно перемешиваются молекулы воздуха и

газа, при этом улучшается качество смешения. Турбулизация потоков достигается их высокими массовыми скоростями в прямооточных горелках или закруткой воздуха и газа (см. раздел I.I). Для качественного сжигания топлива большое значение имеет перемешивание топлива и воздуха при подготовке горючей смеси, а также перемешивание газовых объемов в горящем факеле. Сопоставление интенсивности перемешивания в одинаковых сечениях прямооточной и закрученной струй показывает, что более интенсивное перемешивание на первых 10 калибрах имеет закрученная струя, а после 15 калибров более интенсивная турбулентность у прямооточной. Совершенство процесса смешения можно оценить при помощи параметра  $\bar{x}$ , называемого *неполнотой смешения* или *коэффициентом незавершенности смешения*. Он представляет собой относительное средневзвешенное значение концентрационной неравномерности  $x$ , отнесенное к предельно возможному ее значению  $x_{\text{пр}}$  (т.е. когда смешение отсутствует) при одинаковой средней по сечению смеси концентрации топлива. Определяется неполнота смешения из выражения

$$\bar{x} = \frac{x}{x_{\text{пр}}} = \frac{1}{2G_{\text{см}}} \sum \frac{c_i - \bar{c}}{\bar{c}(1 - \bar{c})} (w\rho f)_i, \quad (2.7)$$

где  $G_{\text{см}}$  - общий расход газозвоздушной смеси;  $\bar{c}, c_i$  - средняя и локальная массовые концентрации смеси,  $\bar{c} = \frac{G_{\text{T}}}{G_{\text{см}}}$ ,  $c_i = \frac{G_{\text{T}_i}}{G_{\text{см}_i}}$ ;  $G_{\text{T}_i}$  - расход топлива через

элементарную площадку рассматриваемого сечения смеси;  $G_{\text{см}_i} = (w\rho f)_i$  - расход газозвоздушной смеси через элементарную площадку.

Коэффициент незавершенности смешения  $\bar{x} = 0$ , если имеет место полное смешение газа с воздухом, а при  $\bar{x} = 1$  смешение полностью отсутствует.

В сечениях, близких к устью горелки, качество смесеобразования является определяющим для надежного и экономичного сжигания топлива. Но именно в этих сечениях коэффициент  $\bar{x}$  не дает возможности оценить локальные распределения концентрации, т.к. он имеет интегральный характер (см. (2.7)). Наиболее объективную оценку незавершенности смешения коэффициент  $\bar{x}$  дает для сечений, достаточно удаленных от среза горелки, что также важно для практики сжигания. Использование  $\bar{x}$  дает возможность сопоставлять поля концентраций и скоростей движения смеси не визуальнo, а с количественной оценкой процесса организации топливовоздушной смеси.

При сжигании газов с низкой теплотой сгорания (доменного, генераторного и т.п.) объемы воздуха и газов в горючей смеси примерно одинаковы. Для таких газов качественное смесеобразование достигается путем закрутки полойно чередующихся потоков газа и воздуха. При сжигании высококалорийных газов смешиваются большие объемы воздуха с малыми объемами газа; в этом случае лучший эффект смешивания достигается при струйном введении

газа в воздушный поток. На рис. 2.6а показано выходное сечение горелки со струйным смесеобразованием. Из рис. 2.6б видно, что для такой горелки при *незакрученном* воздушном потоке ( $\beta = 0^\circ$ , где  $\beta$  - угол наклона лопаток воздушного регистра к потоку воздуха) высокая равномерность смесеобразования достигается на большем расстоянии от среза газовых отверстий, чем при  $\beta > 0^\circ$ , т.е. при незакрученном (прямоструйная горелка) потоке воздуха для лучшего смесеобразования требуется большая скорость  $w_{то}$  (см. (2.2) ... (2.4)).

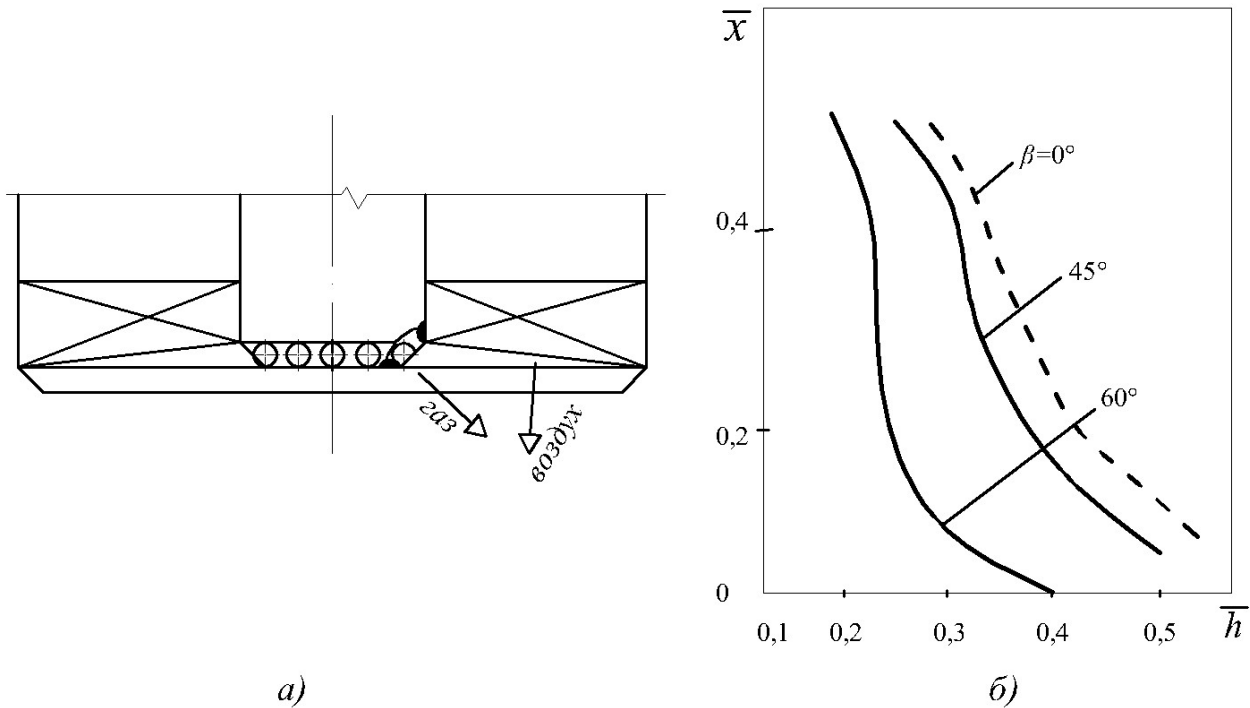


Рис. 2.6. Горелка со струйным смесеобразованием; а) сопло горелки; б) характеристики процесса смесеобразования;  $\beta$  - угол между потоком набегающего воздуха и плоскостью лопаток в воздушном регистре.

Помимо турбулизации газовых потоков в прямоточных горелках и закручивания потоков в завихрывающих горелках для улучшения качества смесеобразования практикуется также организация смесеобразования в виде различных схем взаимодействия газовых струй с циркуляционными течениями за плохообтекаемыми телами - стабилизаторами.

## 2.2. Горение газов

Основной характеристикой горения газа является скорость нормального распространения пламени  $U_n$ , м/с. Общее понятие об этой характеристике было рассмотрено ранее (см. раздел 1.3). Произведение  $U_n$  на плотность смеси  $\rho_{см}$  называется массовой скоростью горения  $U_m, \% \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$

$$U_m = \rho_{cm} U_n. \quad (2.8)$$

Она представляет собой массу смеси, сгорающей в единицу времени на единице поверхности фронта пламени.

При горении газа в горизонтальной трубке свежая топливовоздушная смесь, как более тяжелое вещество по сравнению с продуктами горения, растекается по нижней части трубки, а более легкие продукты горения стремятся вверх. Вследствие этого форма фронта пламени искривлена (рис. 2.7).

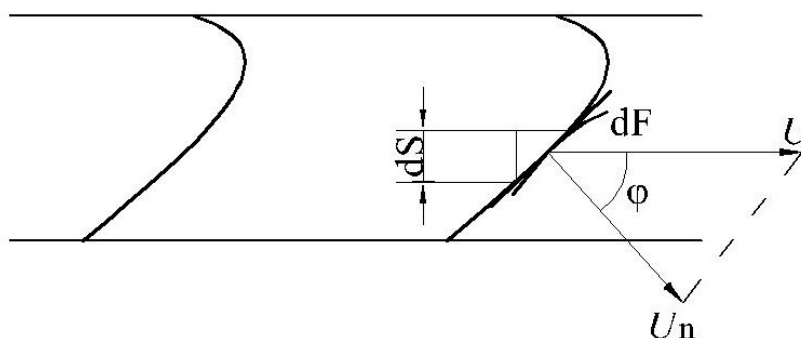


Рис. 2.7. Распространение пламени в горизонтальной трубке

Если принять, что  $F$  - площадь фронта пламени,  $S$  - площадь сечения, трубки, то  $U$  - есть наблюдаемая скорость распространения пламени, и

$$FU_n = SU. \quad (2.9)$$

Это выражение называется законом площадей, физический смысл его: масса смеси, сгоревшая во фронте пламени, равна количеству смеси, поступающей к фронту пламени. Отсюда

$$U = U_n \left( \frac{F}{S} \right), \quad (2.10)$$

т.е. наблюдаемая скорость распространения пламени во столько раз больше нормальной, во сколько раз площадь пламени больше поперечного сечения трубки.

Основной закон горения: скорость распространения пламени возрастает обратно пропорционально  $\cos\varphi$

$$U = \frac{U_n}{\cos\varphi}, \quad (2.11)$$

где  $\varphi$  - угол между нормалью к элементу фронта пламени  $dF$  и направлением распространения пламени  $U$ , а  $dF = \frac{dS}{\cos\varphi}$ , где  $dS$  - проекция элемента фронта

пламени  $dF$  на плоскость, перпендикулярную направлению распространения пламени (см. рис. 2.7).

Формула (2.11) выражает основной закон горения в движущемся газе, сформулированный русским физиком Михельсоном, и названный им законом косинуса. При искривлении поверхности фронта пламени возрастает его площадь, а значит и количество сгорающей смеси. Для стабилизации положения фронта пламени необходимо увеличить скорость подачи свежей смеси. При турбулизации потока смеси (турбулизации горения) площадь фронта пламени заметно возрастает за счет его искривления и разрывов, и это один из приемов интенсификации сжигания топлива.

При поступлении свежей смеси к фронту горения она разогревается, воспламеняется и сгорает в некоторой зоне, ширина которой равна  $\delta$  (см. рис. 2.8).

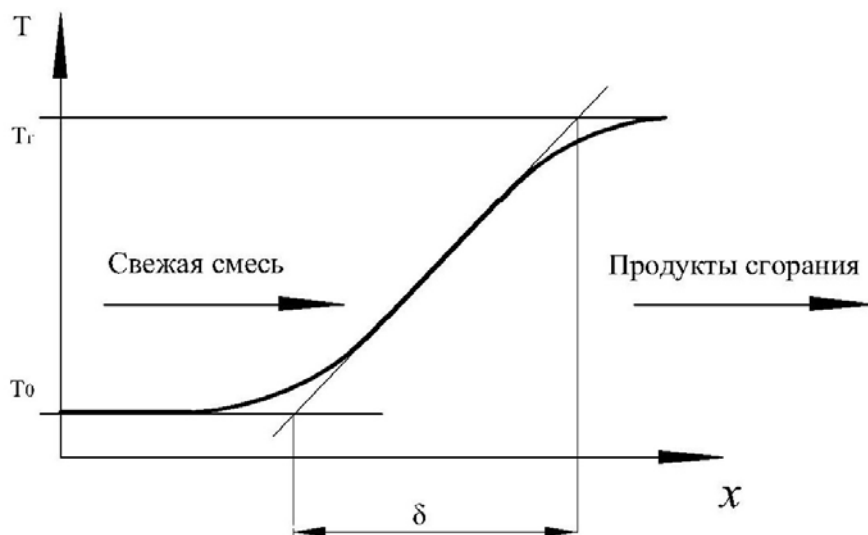


Рис. 2.8. Схема структуры пламени

При этом температура смеси меняется от  $T_0$  до  $T_g$ . Связь между шириной фронта пламени и нормальной скоростью распространения пламени выражается зависимостью

$$U_n = \frac{\delta}{\tau}, \quad (2.12)$$

где  $\delta = \frac{\lambda}{c_p}$  - температуропроводность.

Время прогрева смеси до воспламенения

$$\phi = \frac{d}{U_n} = \frac{b}{U_n^2}, \quad (2.13)$$

т.е. чем больше  $U_n$ , тем меньше толщина пламени и время разогрева.

В [2] приведено пояснение влияния состава смеси, давления и температуры на скорость реакции. Нормальная скорость горения газовых смесей изменяется пропорционально давлению

$$U_n \sim p^v, \quad (2.14)$$

где  $v$  - порядок реакции.

Иначе можно написать

$$U_{n_1} = U_{n_0} \left( \frac{p_1}{p_0} \right)^{-m}, \quad (2.14a)$$

где  $m = 0,20 \dots 0,25$ .

Повышение начальной температуры топливовоздушной смеси ведет к увеличению нормальной скорости распространения пламени:

$$U_{n_1} = U_{n_0} \left( \frac{T_1}{T_0} \right)^n, \quad (2.15)$$

где  $T_1$  и  $T_0$  - температура соответственно подогретой и исходной смеси, К;  $n = 1,7 \dots 1,8$ .

Таким образом, подогрев газовой смеси приводит к значительному росту  $U_n$ , а повышение её давления - к некоторому снижению  $U_n$ . Увеличение  $U_n$  при предварительном подогреве газовой смеси используется практически при сжигании низкокалорийных забалластированных топлив для интенсификации процесса горения.

Скорость горения газов изменяется также и при изменении концентрации горючего и окислителя в смеси. Здесь следует отметить следующие особенности. Скорость нормального распространения пламени будет максимальной при некотором избытке горючего ( $\alpha < 1$ ), в то время как максимальная температура горения достигается при  $\alpha = 1$ . Так, скорость нормального распространения пламени при сжигании метана (основного компонента природного газа) имеет значение  $U_n = 0,28$  м/с при отношении концентрации воздуха и газа в смеси



$$\frac{c_{\text{В}}}{c_{\text{СН4}}} = 9,53 (\alpha = 1) \text{ и } U_{\text{max}} = 0,37 \text{ м/с при } \frac{c_{\text{В}}}{c_{\text{СН4}}} = 8,95 (\alpha < 1).$$

С ростом количества инертных газов в горючей смеси скорость  $U_n$  уменьшается. Так, в смеси метана с кислородом при некотором  $\alpha$  достигаемая максимальная скорость распространения пламени почти в 9 раз больше скорости  $U_n$  для смеси метана с воздухом при тех же условиях сжигания. Эта закономерность используется на практике для снижения скорости горения, а значит локальных тепловыделений и локальных температур. Известно, что с ростом температур в зоне горения увеличивается количество оксидов азота (см. [2]). Для снижения температуры горения, а значит и выхода  $\text{NO}_x$ , в зону горения подаются отработавшие дымовые газы (инертный газ) путем рециркуляции их из хвостовых поверхностей нагрева котла.

При избыточном разбавлении горючей смеси инертным газом снижается скорость  $U_n$  и температура горения, и одновременно увеличиваются тепловые потери (на нагрев инертных газов), горение при этом может вообще прекратиться. Подобный же эффект возникает и при чрезмерном избытке горючего [2]. Предел, ограничивающий распространение пламени вследствие избытка инертных газов (недостатка кислорода) в горючей смеси, называют нижним пределом воспламеняемости смеси, а из-за недостатка топлива - верхним пределом. Если смесь, находящуюся вне этих пределов, поджигать от постороннего источника теплоты, то пламя в ней не будет распространяться, смесь может вспыхнуть, но тут же погаснет. Для метановоздушной смеси нижний предел воспламенения будет при содержании метана в воздухе 5,3%, верхний предел – 15%, для природного газа соответственно 5,1% и 12,1...25,0%. Разбавление горючих газов балластными примесями сужает концентрационные пределы воспламенения. Так, при сжигании того же метана в чистом кислороде нижний предел воспламенения составляет уже 5,1%, а верхний – 61%.

При предварительном подогреве топливовоздушной смеси вследствие увеличения  $U_n$  концентрационные пределы воспламенения расширяются. Влияние же давления имеет неоднозначный характер. При повышении давления выше атмосферного у некоторых смесей (например, водорода с воздухом) пределы воспламенения сужаются, а для других (смеси метана с воздухом) - расширяются. При снижении давления ниже атмосферного концентрационные пределы воспламенения газозвушных смесей сужаются.

Пределы воспламенения технических газов, не содержащих балластных примесей, определяются по правилу Ле - Шателье:

$$C = \frac{100}{v_1 c_1 + v_2 c_2 + \dots + v_n c_n}, \quad (2.16)$$

где  $C$  - верхний (нижний) предел воспламенения газовой смеси, состоящей из  $n$  горючих компонентов, % ;  $v_1, v_2, \dots, v_n$  - относительное содержание горючих компонентов в смеси, %;  $c_1, c_2, \dots, c_n$  - верхний (нижний) предел воспламенения

каждого горючего компонента, %.

Коэффициент избытка воздуха, соответствующий верхнему (нижнему) пределу воспламенения горючей смеси определяется из

$$\delta = \frac{100 - C}{C V^0}, \quad (2.17)$$

где  $V^0$  - теоретическое количество воздуха, необходимое для полного сжигания смеси,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ .

Для определения концентрационных пределов воспламенения за-балластированных газов можно использовать выражение:

$$C_{\text{д}} = C \frac{\frac{1 + V_{\text{д}}}{1 - V_{\text{д}}} \cdot 100}{100 + C V_{\text{д}} (1 - V_{\text{д}})}, \quad (2.18)$$

где  $V_{\text{д}} = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{N}_2}$ .

Рассмотренные выше положения относятся к распространению пламени в ламинарном потоке. При переходе к горению в турбулизированном потоке скорость распространения пламени резко возрастает. Существуют две теории, объясняющие механизм турбулентного распространения пламени: теория поверхностного горения и теория объемного горения.

По первой теории действие турбулентности искривляет фронт пламени, увеличивая его поверхность, но структура зоны горения не нарушается, остается сплошной, т.е. остается связь между скоростями ламинарного и турбулентного горения. В этом случае скорость турбулентного распространения пламени  $U_{\text{T}}$  определяется из выражения:

$$U_{\text{T}} = U_{\text{n}} \frac{F_{\text{T}}}{F_{\text{л}}}, \quad (2.19)$$

где  $F_{\text{T}}$ ,  $F_{\text{л}}$  - соответственно площади фронта турбулентного и ламинарного пламени.

Процесс турбулентного распространения пламени в соответствии с первой теорией зависит от мелкомасштабной турбулентности, от гидродинамических условий в потоке, и

$$\frac{U_T}{U_n} \sim \sqrt{Re}. \quad (2.20)$$

По второй теории турбулентное распределение пламени проходит при наличии крупномасштабной турбулентности. При этом фронт пламени может разрываться на отдельные зоны; моли горящего газа и продуктов сгорания забрасываются в прилегающие слои свежей смеси, создавая новые очаги горения. Фронтом горения является суммарная поверхность горящих молей смеси, находящихся в данный момент в зоне горения. Скорость горения  $U_T$  определяется аэродинамическими характеристиками потока, и

$$U_T \sim Re. \quad (2.21)$$

На рис. 2.9 поясняется представление о фронтах горения при ламинарном и турбулентном распространении пламени; на рис. 2.10 показано изменение относительной скорости распространения пламени в зависимости от режима движения смеси.

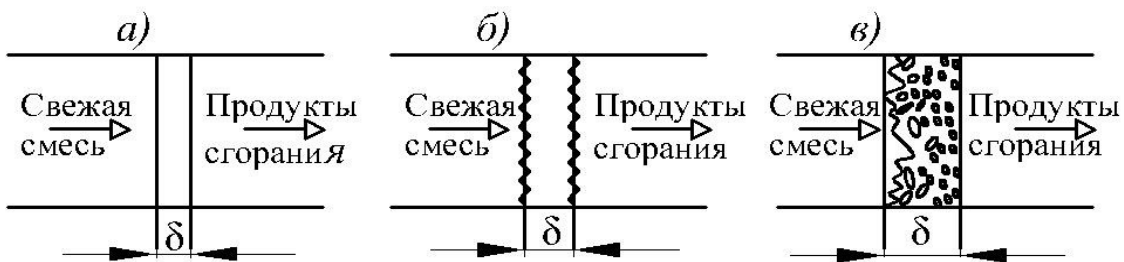


Рис. 2.9. Фронт горения однородной горючей смеси;

а)- ламинарное распространение пламени; б)- турбулентное распространение пламени при мелкомасштабной турбулентности; в)- то же при крупномасштабной турбулентности

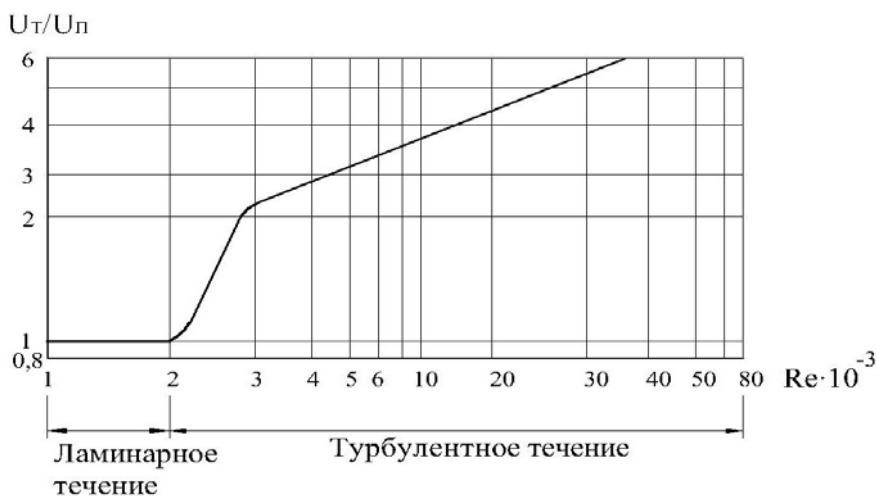


Рис. 2.10. Зависимость относительной скорости распространения пламени от режима движения горючей смеси

### 2.3. Горение газообразного топлива в факеле

Структура факела и процессы горения, происходящие в нем, зависят от организации подготовки топливовоздушной смеси в горелке и непосредственно в факеле.

Сжигание подготовленной в горелке однородной газовой (гомогенной) смеси. При ламинарном сжигании гомогенной смеси скорость смеси в факеле распределяется по параболе с максимумом на оси горелки радиусом  $r_0$  (рис. 2.11).

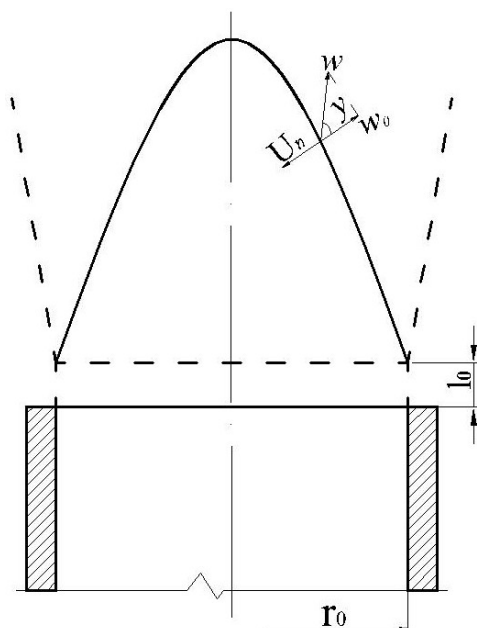


Рис. 2.11. Схема ламинарного факела гомогенной смеси

Горение происходит по поверхности конусообразного факела, внутри конуса смесь не горит. В каждой точке конуса (поверхности горения) нормальная составляющая скорости движения газа  $w_n$  равна нормальной скорости распространения пламени и противоположна ей по направлению (рис. 2.9).

$$w_n = w_{см} \cos Y = -U_n \quad (2.22)$$

Факел стабилизируется несколько выше среза горелки, на расстоянии  $l_0$ , необходимом для прогрева гомогенной смеси. Длина ламинарного факела

$$l_{ф} = \frac{w_{см} r_0}{U_n} \quad (2.23)$$

Из рис. 2.11 видно, что скорость течения смеси  $w_{см}$  может быть выше  $U_n$ , при этом горение будет устойчивым, если соблюдается равенство (2.22). При увеличении  $w_{см}$  до случая, когда  $w_n$  превысит  $U_n$ , произойдет отрыв пламени,

при уменьшении  $w_{см}$  до условия  $w_{см} < U_n$  (при этом  $w_n$  всегда будет меньше  $U_n$ ) произойдет проскок пламени внутрь горелки.

Метод сжигания гомогенной смеси в ламинарном потоке применяется лишь в небольших нагревательных приборах, в промышленности он не используется.

При турбулентном сжигании гомогенной смеси концентрация топлива уменьшается к периферии факела, а температура возрастает (рис. 2.12).

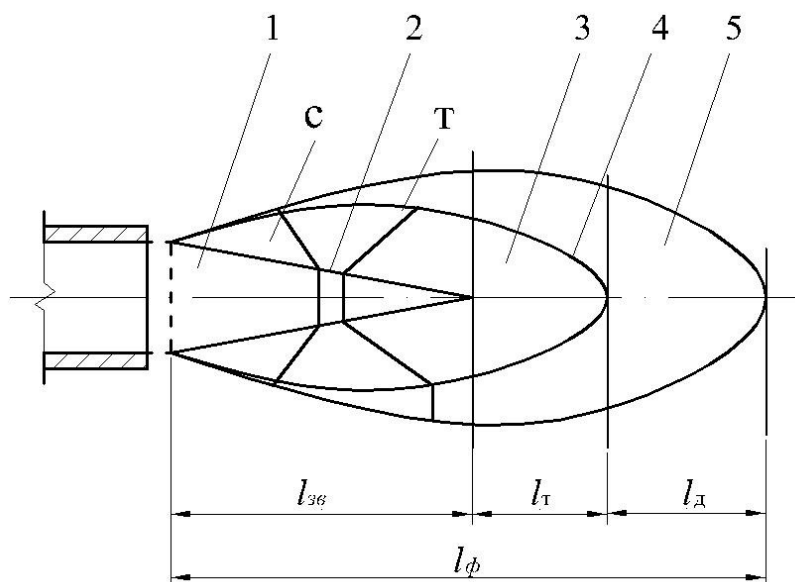


Рис. 2.12. Схема турбулентного факела гомогенной смеси:

1- свежая смесь; 2 - конус-поверхность воспламенения; 3 - турбулентный фронт горения; 4 - видимый фронт горения; 5 - зона дожигания; С - изменение концентрации горючего в смеси по сечению факела; Т - изменение температуры

В центральном конусе движется свежая смесь, температура и концентрация горючего в нем неизменна. От воспламенившейся поверхности 2 (рис. 2.12) турбулентной теплопроводностью и турбулентной диффузией теплота передается соседним слоям, куда, вследствие турбулентности потока смеси забрасываются моли свежей смеси, где они и сгорают, образуя зону турбулентного фронта пламени (зона 3, рис. 2.12). Длина зоны существования свежей смеси в турбулентном факеле (длина зоны воспламенения)

$$l_{зв} = \frac{w_{см} \Gamma_0}{U_T}, \quad (2.24)$$

где  $U_T$  - скорость турбулентного распространения пламени (см.(2.19));  
Толщина турбулентного фронта горения

$$d_T = \frac{l_T w'}{2U_n}, \quad (2.25)$$

где  $l_T$  - длина пути свободного движения моля смеси в турбулентном фронте пламени;  $w'$  - пульсационная скорость движения моля (разница между мгновенной скоростью движения отдельного моля газа и средней скоростью движения потока).

Пульсационная скорость возрастает при увеличении скорости истечения смеси  $w_{см}$ , поэтому с ростом  $w_{см}$  и уменьшением диаметра горелки толщина зоны турбулентного горения  $\delta_T$  будет возрастать, с ростом скорости  $U_n$  толщина фронта турбулентного горения уменьшается. Видимым фронтом горения является участок факела  $l_{зв} + \delta_T$ . Степень выгорания топлива на этом участке даже при больших скоростях течения смеси достигает 90%. За видимым фронтом находится зона догорания длиной  $l_d$ . Длина  $l_d$  тем больше, чем меньше скорость  $U_n$  и больше скорость истечения смеси  $w_{см}$ . При уменьшении концентрации топлива в горючей смеси  $l_d$  увеличивается.

Как в ламинарном, так и в турбулентном факеле сгорание гомогенной смеси в области видимого фронта горения происходит по кинетическому принципу, коэффициент избытка воздуха в такой смеси  $\alpha = 1,02...1,05$ , факел при этом короткий, прозрачный, без продуктов неполного горения, горение происходит при неограниченно высоком объемном теплонапряжении. В зоне догорания оставшиеся газы и продукты неполного горения сгорают за счет диффузии кислорода из топочного пространства, т.е. по диффузионному принципу.

Сжигание газа при отдельной подаче топлива и воздуха в зону горения. В этом случае процессы смешения топлива и окислителя и процессы горения развиваются параллельно, скорость и полнота сгорания определяются скоростью и полнотой смешения, происходящей за счет молекулярной или турбулентной диффузии.

При ламинарном диффузионном горении газов фронт горения существует за счет взаимной молекулярной диффузии газа и воздуха, т.е. газ сгорает в диффузионном факеле. Во фронте горения у диффузионного факела большая концентрация горючего и меньшие скорости горения по сравнению с гомогенным факелом, поэтому он обладает большей устойчивостью при изменении тепловой мощности от нуля до максимально возможной по условиям отрыва, прорыв пламени в горелку исключается именно из-за отдельной подачи газа и воздуха.

На рис. 2.13 приведена схема свободного ламинарного диффузионного факела. Концентрация горючего в таком факеле изменяется от максимума на оси горелки до нуля во фронте пламени, концентрация кислорода - от нуля во фронте пламени до его значения в окружающей среде, концентрация продуктов сгорания максимальна во фронте пламени и уменьшается с переходом как внутрь факела, так и в окружающую среду. Толщина фронта (зоны) горения мала и не превышает 1 мм. Зона устойчивого горения устанавливается по по-

верхности, на которой газ и кислород находятся в стехиометрическом соотношении для полного горения.

Длина диффузионного ламинарного факела определяется временем  $\tau$  диффузии кислорода от воздушного потока до оси факела, т.е. до момента полного выгорания факела ((•) а на рис. 2.13). Тогда

$$\Phi = \frac{r_0^2}{2D}, \quad (2.26)$$

$$l_{\Phi} = w_{\Gamma} \Phi = \frac{w_{\Gamma} r_0^2}{2D}, \quad (2.27)$$

где  $D$  - коэффициент молекулярной диффузии.

Для круглых горелок объемный расход газа

$$Q_0 \sim w_{\Gamma} r_0^2, \quad (2.28)$$

для щелевых (на единицу высоты выходной щели)

$$Q_0 \sim w_{\Gamma} b, \quad (2.29)$$

где  $b$  - ширина выходной щели горелки.

Тогда длина факела для круглой горелки

$$l_{\Phi} \sim \frac{Q_0}{D}, \quad (2.30)$$

а для щелевой

$$l_{\Phi} \sim \frac{Q_0 b}{D}, \quad (2.31)$$

Из формул (2.30) и (2.31) следует, что при постоянном объемном расходе газа длина факела круглых горелок не зависит от их диаметра и скорости истечения, а для щелевых горелок длина факела пропорциональна их ширине; с увеличением теплоты сгорания газа длина факела увеличивается вследствие увеличения количества воздуха, необходимого для горения.

Конус газа диффузионного факела, попадая в топочное пространство, нагревается (в отсутствии кислорода), происходит разложение части газа с образованием сажи и свободного углерода, которые, с одной стороны, вызывают свечение пламени, а с другой стороны, сгорают не полностью, что определяет химический недожог. Наличие химического недожога характерно для диффузионного факела.

При турбулентном диффузионном горении, в отличие от ламинарного, в факеле нет четкого конусного фронта пламени, он разрушен пульсациями.

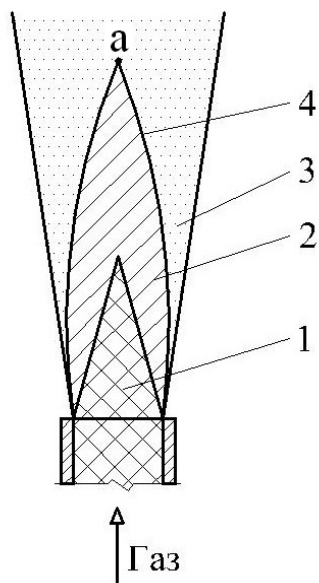


Рис. 2.13. Структура свободного ламинарного диффузионного факела: 1- чистый газ; 2- смесь газа и продуктов сгорания; 3- смесь продуктов сгорания и воздуха; 4- фронт пламени

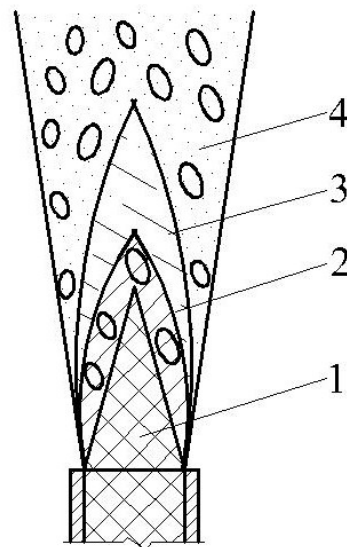


Рис. 2.14. Структура свободного турбулентного диффузионного факела: 1- ядро чистого газа; 2 - зона медленного горения; 3- зона интенсивного горения; 4- зона догорания отдельных молей газа

В прямоточном факеле с естественной турбулизацией потоков газа и воздуха (за счет повышения их скоростей) имеется ядро чистого газа 1 (рис. 2.14), зона сравнительно медленного горения 2 (богатая топливом смесь), размытая зона интенсивного горения 3 с высоким содержанием продуктов горения, зона горения 4 с преобладанием в ней воздуха. Четких границ между этими зонами нет, они перемещаются, пульсируют. Особенности такого факела: протекание процесса горения по всему его объему; повышенная интенсивность горения; большая прозрачность факела и меньшая его устойчивость к отрыву (по сравнению с ламинарным); зажигание свежих порций топлива по его периферии за счет теплоты продуктов сгорания, эжектируемых из топочного пространства к устью горелки (см. рис. 1.25).

Искусственная турбулизация потоков воздуха и (в отдельных случаях) газа достигается при помощи различных закручивающих устройств. Типы закру-



чивающих устройств и расчетные зависимости крутки были рассмотрены ранее (см. раздел 1.1.). Они полностью относятся к условиям сжигания газообразного топлива. Структура закрученного турбулентного факела и процессы, происходящие в нем, приведены на рис. 1.25 и рис. 1.30 и в пояснениях к ним. Здесь мы отметим некоторые особенности такого факела при сжигании газа.

Граница зоны II (рис. 1.25) определяется моментом, когда прекращается действие первичных инерционных сил струй газообразного топлива, а дальнейшее движение молей газа определяется характеристиками потока воздуха.

В зоне IV происходит расчленение потока на отдельные очаги горения разрозненных молей газа.

В остальном все процессы, происходящие при сжигании газообразного топлива в закрученном турбулентном факеле те же, что и при сжигании распыленного жидкого топлива.

Для успешной работы газовой горелки необходимо, чтобы время пребывания топлива в объеме факела было минимальным. Для этого горючий газ уже в начальном сечении факела должен быть внедрен в поток отдельными зонами, которые будут дробиться турбулентными пульсациями потока. Наличие большой неравномерности распределения газа, т.е. затянутого смесеобразования, визуально наблюдается как плотное красноватое, коптящее пламя. При быстром перемешивании газа и воздуха пламя прозрачное, без излучения в видимом спектре, излучение в видимом спектре с голубым оттенком говорит о некоторой задержке смесеобразования, которая не влияет отрицательно на конечные характеристики процесса.

Оценить длину и форму газового факела можно, используя те же положения, что приведены в разделе 1.3 для жидкого топлива. При этом следует учесть, что при сжигании газообразного топлива длина и ширина факела определяются только условиями перемешивания и аэродинамики потоков. Время индукции и общее время сгорания единицы массы топлива будут меньше, чем при сжигании жидкого, топлива, т.к. отсутствуют процессы испарения. Длину одиночного газового факела можно оценить, используя выражение

$$l_{\phi} = \frac{\sqrt{w_x}}{w} \frac{\sigma}{(\sigma - 0,5)^2} \sqrt{B}, \quad (2.32)$$

где  $\frac{\sqrt{w_x}}{w}$  - параметр, характеризующий влияние поля скоростей потока на длину факела, он уменьшается с ростом степени крутки;  $\alpha$  - средний коэффициент избытка воздуха на срезе горелки (до воспламенения);  $B$  - производительность горелки.

Сжигание газа при комбинированном смещении. В этом случае первичный воздух смешивается с топливом в горелке при  $\alpha < 1$ , вторичный воздух подается в зону горения. Процесс сгорания происходит в промежуточной (между кинетической и диффузионной) области. С учетом этого принципа сжигания

конструируются, например, горелочные устройства с инжекционными горелками. Содержание первичного воздуха принимается в зависимости от вида газа таким, чтобы в пламени отсутствовали частицы сажи, и обеспечивалась устойчивость горения в необходимых пределах. При таком сжигании факел может иметь два видимых фронта горения: внутренний, возникающий за счет первичного воздуха в гомогенной смеси, и наружный, образующийся за счет диффузии кислорода из вторичного воздуха, процессы смешения улучшаются, а неполнота сгорания снижается по сравнению с чисто диффузионным способом сжигания.

Выбор того или другого способа сжигания газа зависит от местных условий и требований технологического процесса.

Устойчивость горения. Принципы поддержания устойчивого горения рассмотрены в разделе 1.3. Они справедливы и для газообразного топлива. Как и при сжигании жидкого топлива, пределы устойчивой работы газовых горелок ограничиваются скоростями отрыва и проскока пламени. На рис. 2.15 приведены кривые, характеризующие явления отрыва и проскока пламени при сжигании смеси природного газа с воздухом.

На кривых видно, что по мере уменьшения в смеси первичного воздуха устойчивость пламени возрастает и достигает максимума при его уменьшении до нуля, т.е. при переходе к диффузионному горению. Однако при этом возрастает неполнота сгорания (пламя окрашивается в желтый цвет). На практике скорость потока любых газоздушных смесей в несколько раз больше, чем скорость отрыва. Предотвращение отрыва пламени достигается при помощи стабилизаторов горения (см. раздел 1.3). Для стабилизации пламени горелок, выдающих осесимметричные струи, применяют огнеупорные цилиндрические туннели с внезапным расширением (рис. 2.16а) в которых тепловое напряжение может достигать  $400 \text{ ГДж/м}^3$ , температура -  $1600^\circ\text{C}$ , а скорость истечения холодной смеси с устойчивой стабилизацией пламени - до  $200 \text{ м/с}$ .

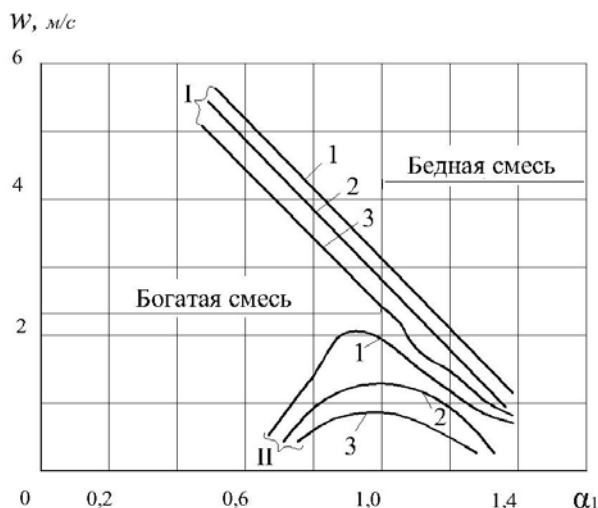


Рис. 2.15. Зависимость проскока и отрыва пламени от скорости газоздушной смеси и коэффициента избытка первичного воздуха  $\alpha_1$ : I - отрыв пламени; II - проскок пламени; 1...3 - диаметры огневых каналов горелок, мм: 1 - 15; 2 - 25; 3 - 32;  $\alpha_1$  - коэффициент избытка первичного воздуха

Для стабилизации горения закрученных струй применяют цилиндрические или конусные (с углом раскрытия 30...60°) туннели (рис. 2.16б,в).

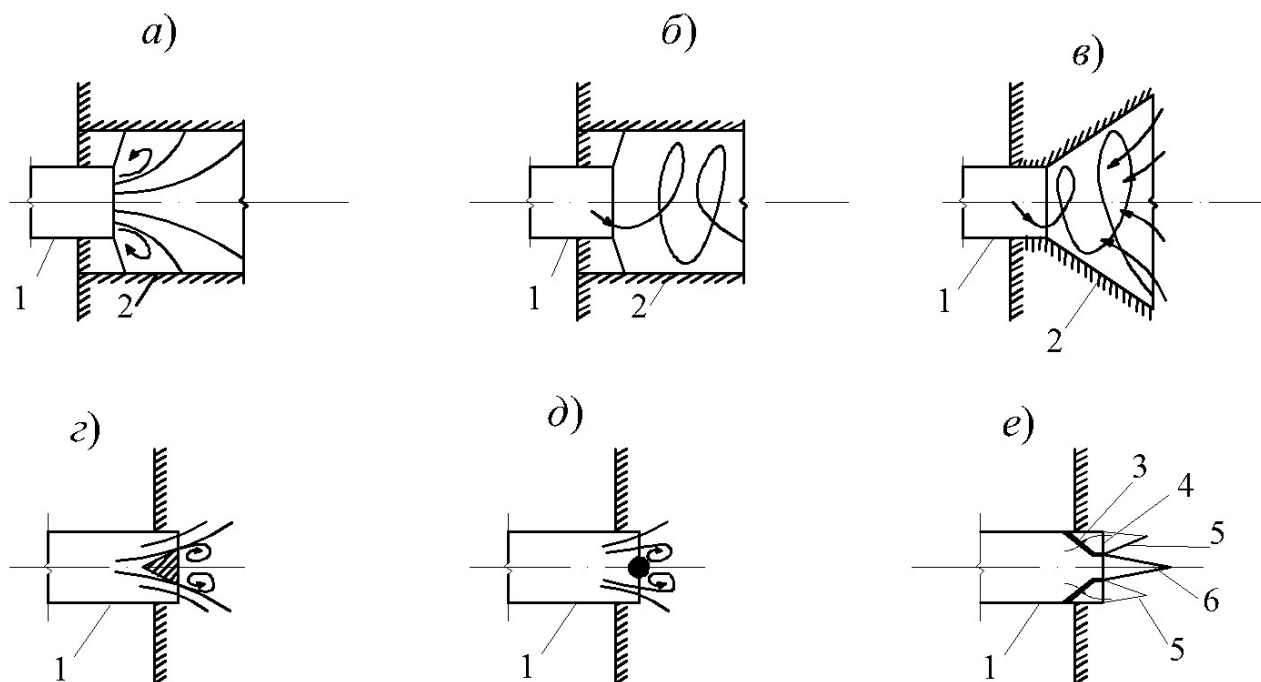


Рис. 2.16.Стабилизаторы горения:

1 - огневой насадок горелки; 2 - туннель; 3 - боковые отверстия; 4 - кольцевой канал; 5 - кольцевое пламя; 6- пламя основного потока газозвушной смеси

Если установка туннелей невозможна или нецелесообразна, то для стабилизации пламени применяют плохобтекаемые тела (рис. 2.16г, д). В инжекционных горелках используются стабилизаторы горения, образующие вспомогательное кольцевое пламя (рис. 2.16е).

## 2.4. Горелки для сжигания газа

К горелкам для сжигания газа предъявляются следующие требования:

- создание условий для полного сгорания газа с минимальным избытком воздуха и выходом вредных веществ в продуктах сгорания;
- обеспечение максимального использования теплоты сжигаемого газа;
- возможность регулирования в пределах изменения нагрузки теплоагрегата;
- отсутствие шума;
- простота конструкции, удобство эксплуатации и ремонта;
- возможность применения средств автоматизации и безопасности;
- современный дизайн.

Основные технические характеристики горелок (в соответствии с ГОСТ 17356 – 71\*): - тепловая мощность - количество теплоты, выделяющейся при полном сгорании секундного расхода газа, проходящего через горелку, кВт

$$Q = Q_H^p V_G, \quad (2.33)$$

где  $V_G$  - расход газа, м<sup>3</sup>/с.

Различают номинальную, максимальную и минимальную тепловую мощность горелки. Номинальная тепловая мощность  $Q^{\text{НОМ}}$  - максимально достигнутая мощность при длительной работе горелки с минимально допустимой по нормам неполнотой сгорания. Максимальная тепловая мощность  $Q^{\text{max}}$  составляет 0,9 от мощности, соответствующе верхнему пределу работы горелки. Минимальная тепловая мощность  $Q^{\text{min}}$  - мощность на нижнем пределе устойчивой работы горелки с коэффициентом избытка воздуха  $\alpha = 1,1$ . Коэффициент избытка воздуха в пределах от минимальной до максимальной мощности должен находиться в пределах  $0,9 \leq \alpha \leq 1,1$ ;

– коэффициент предельного регулирования по тепловой мощности -  $K_{\text{пр}}$

$$K_{\text{пр}} = \frac{Q^{\text{max}}}{Q^{\text{min}}}, \quad (2.34)$$

– коэффициент рабочего регулирования -  $K_{\text{рр}}$

$$K_{\text{рр}} = \frac{Q^{\text{НОМ}}}{Q^{\text{min}}};$$

– давление газа и воздуха перед горелкой  $P$ , Па: номинальное давление соответствует  $Q^{\text{НОМ}}$ ; максимальное и минимальное - соответственно  $Q^{\text{max}}$  и  $Q^{\text{min}}$ ;

– удельная металлоемкость  $m$ , кг/кВт - отношение массы горелки к  $Q^{\text{НОМ}}$ ;

– шумовая характеристика - уровень звукового давления, создаваемого горелкой при работе не должен превышать 85 дБ на расстоянии 1 м от горелки на высоте 1,5 м от пола;

– номинальная относительная длина факела - расстояние в калибрах выходного сечения горелки по оси факела от среза горелки, работающей с номинальной тепловой нагрузкой, до точки, где концентрация  $\text{CO}_2$  при  $\alpha = 1$  составляет 95% от максимального значения;

– давление (разрежение) в камере сгорания, Па - давление (разрежение) в камере сгорания в зоне выходного сечения горелки при  $Q^{\text{НОМ}}$ , Па;

- коэффициент избытка первичного воздуха  $\alpha_1$  показывает, какая часть воздуха от теоретически необходимого подается в горелку предварительно (до пламени);
- коэффициент избытка вторичного воздуха  $\alpha_2$  показывает, какая часть воздуха от теоретически необходимого подается в зону горения;
- объемный коэффициент инжекции или кратность инжекции  $n$  есть отношение объемного количества подсасываемого горелкой первичного воздуха к объемному расходу газа.

К дополнительным характеристикам горелки относятся диаметр газового сопла и выходного сечения горелки, допустимые температуры газа и воздуха, теплота сгорания и плотность сжигаемого газа, угол раскрытия факела, способ стабилизации горения, интенсивность крутки и др.

Классификация горелок. В соответствии с ГОСТ 21204-83\* по способу подачи воздуха и коэффициенту избытка первичного воздуха  $\alpha_1$  горелки подразделяются на диффузионные ( $\alpha_1 = 0$ ), инжекционные ( $\alpha_1 > 1$  и  $\alpha_1 < 1$ ), с принудительной подачей воздуха (дутьевые).

На рис. 2.17 приведены принципиальные схемы газовых горелок, иллюстрирующие эту классификацию. В приложении 2 приведен перечень газовых горелок промышленного назначения в соответствии с предложенной классификацией.

В котельной технике наибольшее применение имеют горелки с принудительной подачей воздуха. Воздух, необходимый для горения, нагнетается в горелки вентилятором или компрессором. Газ из газопровода подается (рис. 2.17г) в газораспределительное устройство, вытекая из которого, смешивается с потоком воздуха. Подготовленная газоздушная смесь подается в топку. В зависимости от конструкции работают эти горелки на газе низкого или среднего давления.

На рис. 2.18, приведена классификация газовых горелок с принудительной подачей воздуха, а на рис. 2.19 - схемы некоторых из них.

Все горелочные устройства, независимо от вида сжигаемого топлива, подразделяются соответственно типу топливоиспользующих установок на котельные, газотурбинные, печные и т.д. В энергетике горелочные устройства делятся на четыре группы; микро (для котлов производительностью до 2 т/ч); малые (для котлов до 25 т/ч); средние (для котлов до 160 т/ч); большие (для котлов более 160 т/ч).

В качестве главного параметра горелок принята их единичная тепловая производительность по наиболее трудно сжигаемому топливу. В таблице 2.1 приведен ряд типоразмеров горелок, предназначенных для комплектации котлов любой производительности (на котлы производительностью менее 25 т/ч рекомендуется устанавливать не более двух горелок).

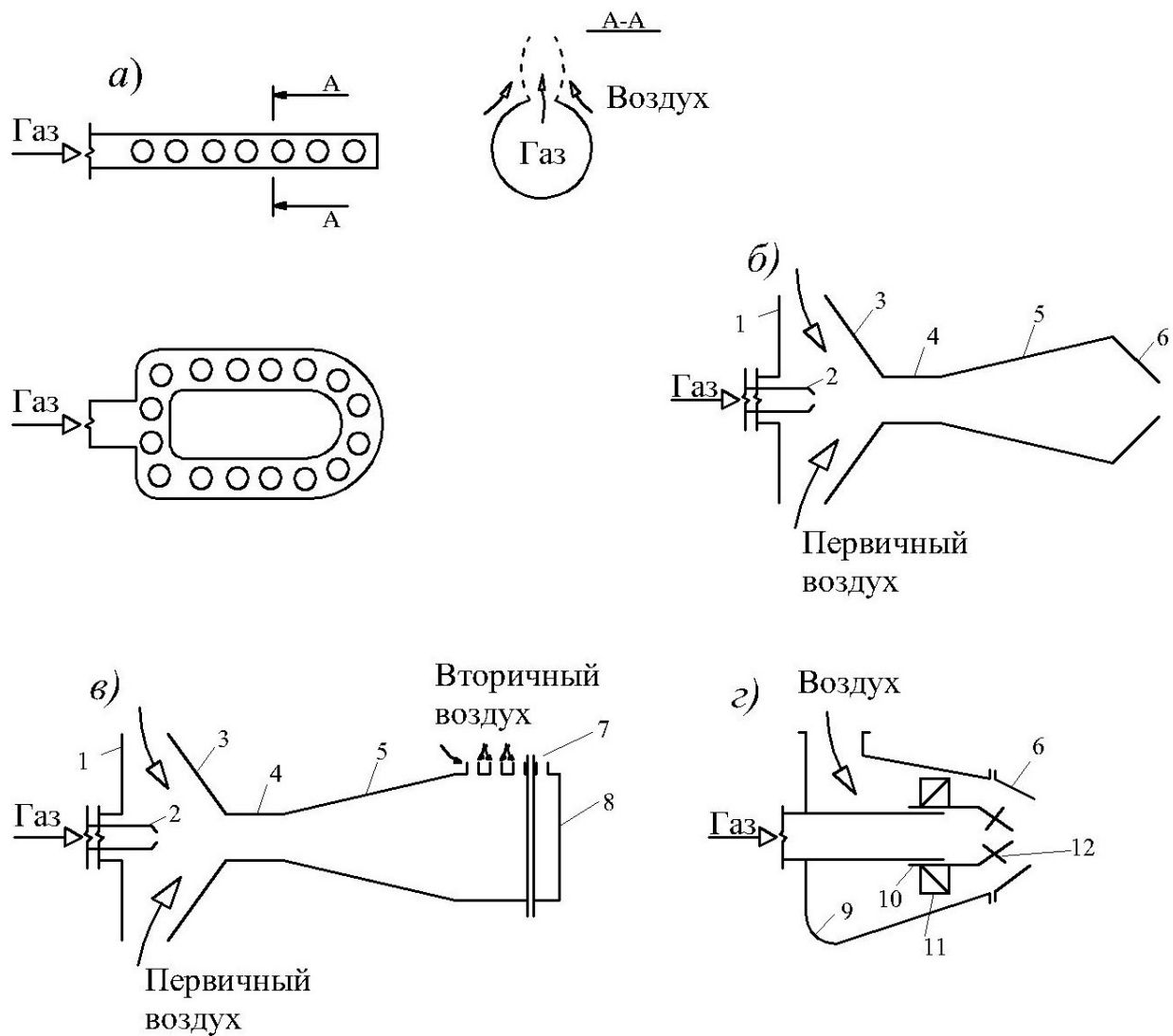


Рис. 2.17. Принципиальные схемы горелок:

а) диффузионная; б), в) инжекционные; г) с принудительной подачей воздуха; 1 - воздушная заслонка; 2- сопло; 3 - инжектор; 4 - горловина; 5 - диффузор; 6 - насадок; 7 - огневые отверстия; 8 - коллектор; 9 - корпус; 10 - газораспределительное устройство; 11 - завихритель; 12 - отверстия для выхода газа

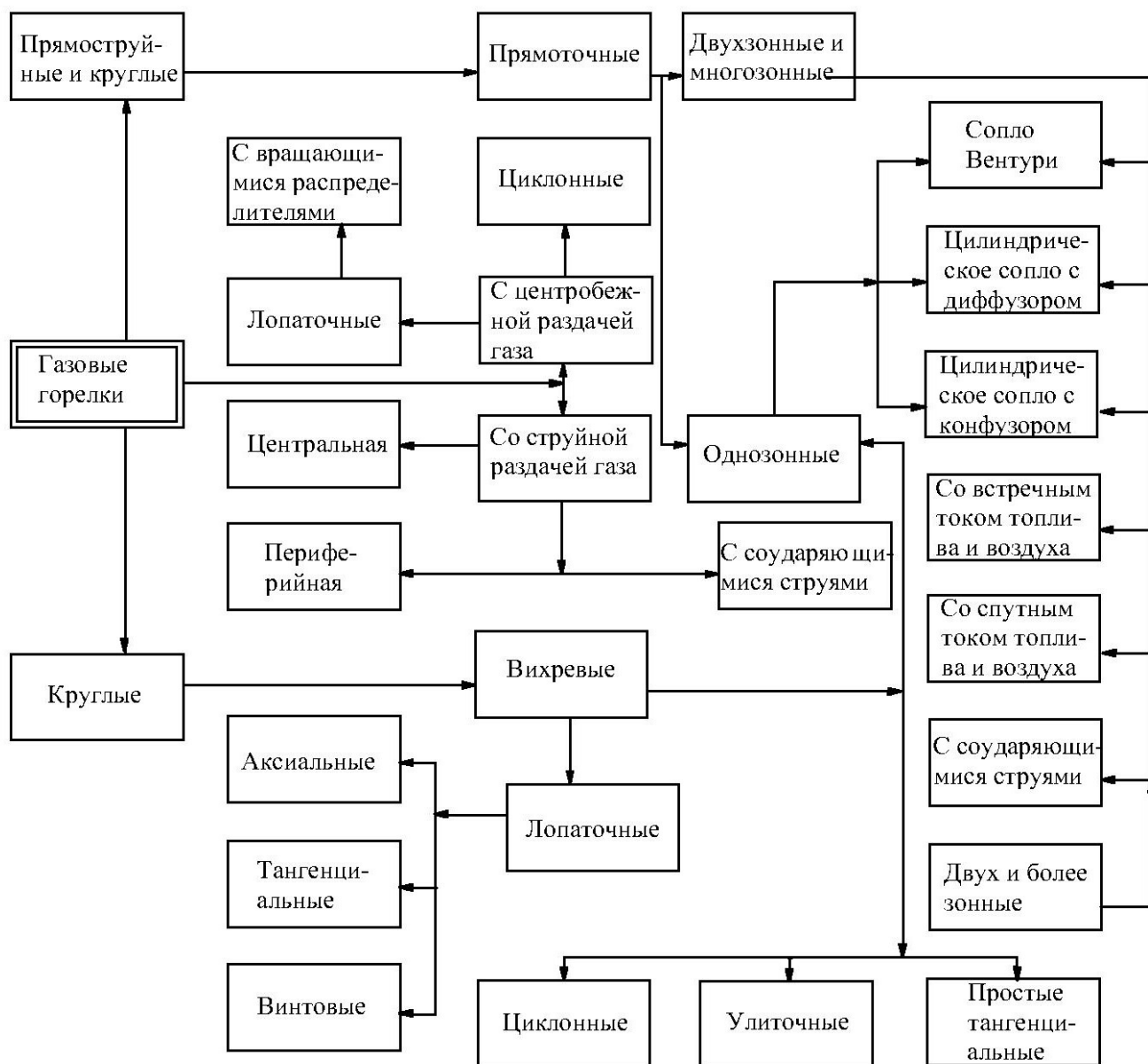


Рис. 2.18. Классификация газовых двухпроводных горелок

В качестве расчетных приняты следующие параметры рабочих сред: теплота сгорания мазута 38 МДж/кг; плотность 1,0 кг/дм<sup>3</sup>; рабочая вязкость мазута 3,0°ВУ; теплота сгорания газа 35,6 МДж/кг, плотность 0,8 кг/дм<sup>3</sup> температура воздуха 20°С (200°С - при наличии воздухоподогревателя).

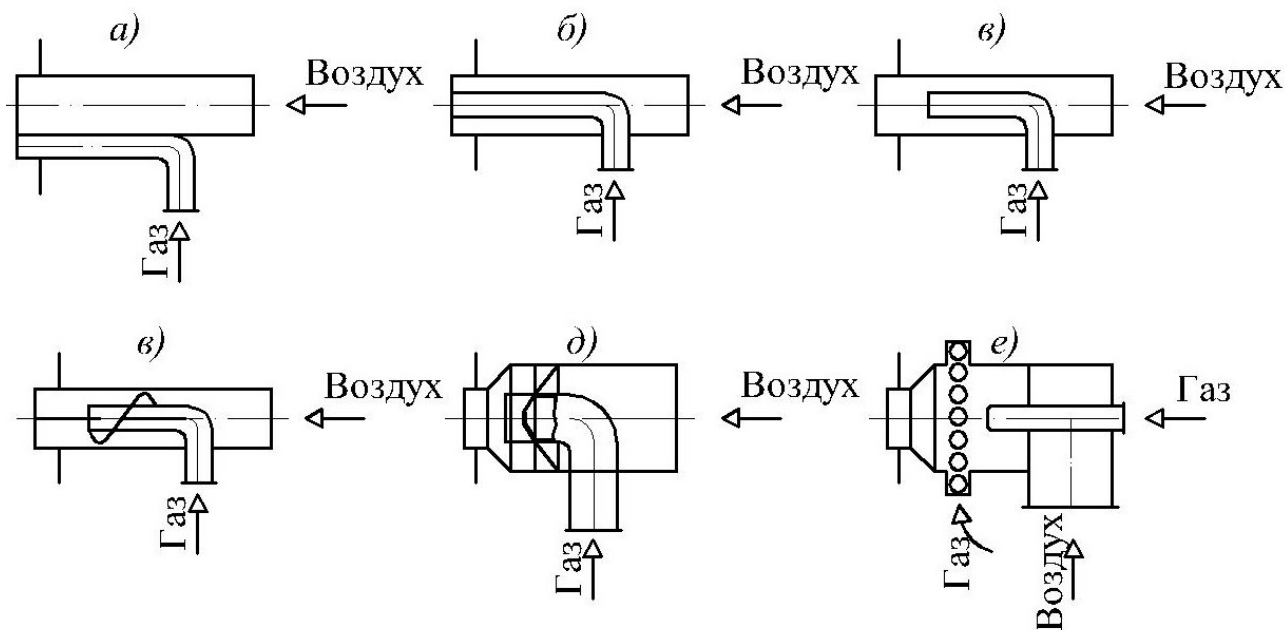


Рис. 2.19. Схемы газовых двухпроводных горелок

а) прямотруйная или круглая прямоточная; б) прямоточная типа «труба в трубе»; в) горелка «труба в трубе» с частичным предварительным смешением газа с воздухом; г) круглая вихревая винтовая горелка; д) с центральной струйной раздачей газа в закрученный поток воздуха; е) круглая вихревая с центральной и периферийной струйной раздачей газа и улиточным (тангенциальным) подводом воздуха.

Таблица 2.1

### Рекомендованный ряд типоразмеров горелочных устройств

Производительность горелки по мазуту, кг/ч	Теплопроизводительность горелки, МВт		Производительность горелки по мазуту, кг/ч	Теплопроизводительность горелки, МВт	
	максимальная	допустимое отклонение		максимальная	допустимое отклонение
100,0	1,056	-0,0583	1050,0	11,278	-1,2805
165,0	1,750	-0,0917	1350,0	14,417	-1,7444
200,0	2,083	-0,1167	2100,0	22,555	-2,5583
280,0	3,028	-0,0750	2500,0	26,750	
330,0	3,500	-0,4083	4000,0	42,694	-
425,0	4,528	-0,5222	5000,0	53,055	-
565,0	6,055	-0,6972	6000,0	63,972	-
675,0	7,222	-0,9305	7500,0	79,889	-
850,0	9,083	-1,0472			



Конструкции горелок. Многообразие типов горелочных устройств (см. приложение) и ограниченность объема учебного пособия не позволяют сколько-нибудь полно рассмотреть здесь конструкции существующих горелок. Поэтому ограничимся рассмотрением конструкции лишь некоторых из них - наиболее распространенных или интересных с точки зрения применения.

В большинстве чугунных или стальных секционных котлов проектным топливом является твердое. При переводе таких котлов на сжигание газа они оборудуются многофакельными инжекционными горелками низкого давления с  $\alpha_1 = 0,4...0,6$ . Горелки устанавливаются непосредственно на колосниковой решетке во всю длину. На рис. 2.20 приведена конструкция такой горелки в сварном исполнении с коллектором удлиненной формы.

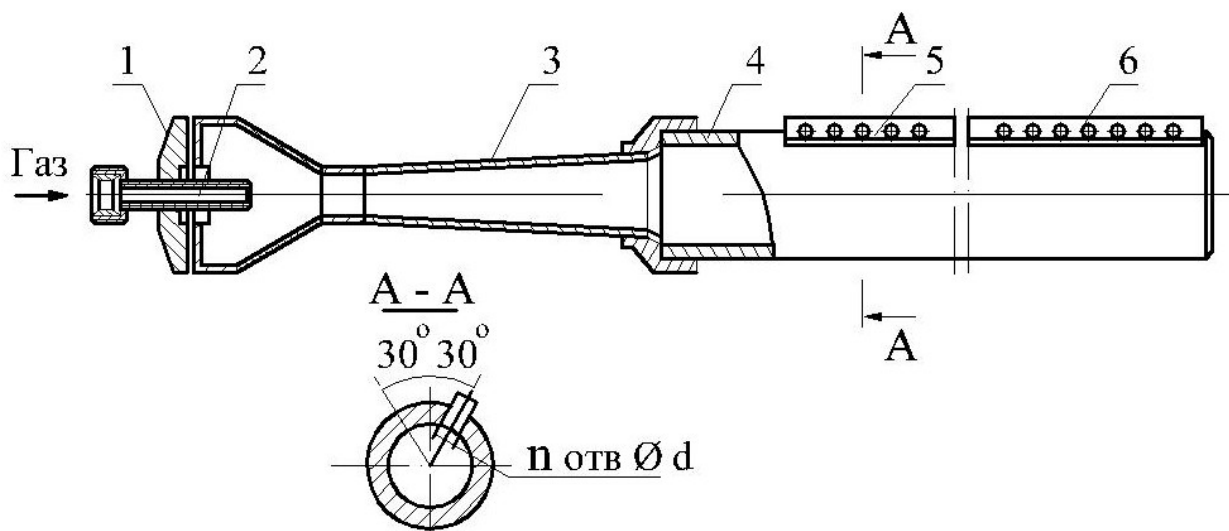


Рис. 2.20. Инжекционная многофакельная горелка:

1 - шайба для регулирования первичного воздуха; 2 - сопло; 3 - смеситель; 4 - распределительный коллектор; 5 - приварные полосы; 6 - огневые каналы

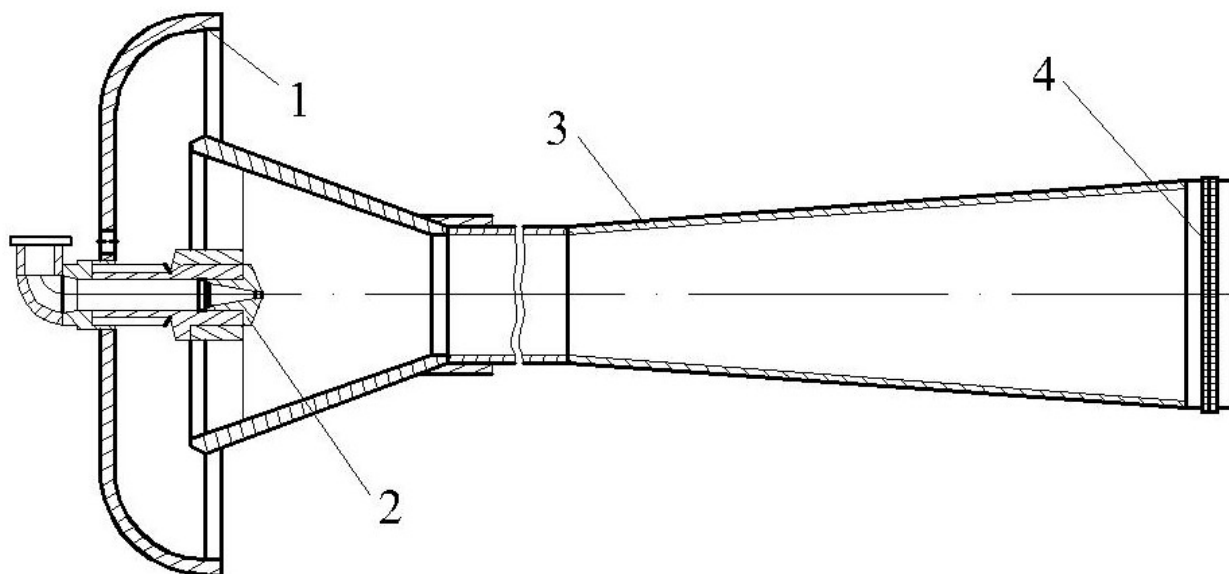


Рис. 2.21. Инжекционная горелка ИГК с пластинчатым стабилизатором:

1 - воздушная заслонка; 2 - сопло; 3 - смеситель; 4 - пластинчатый стабилизатор

Для сжигания газа среднего давления секционные котлы оборудуются горелками типа ИГК с  $\alpha_1 > 1$  (рис. 2.21). Особенностью этой горелки является наличие пластинчатого стабилизатора, при установке её не требуются керамический туннель и охлаждение огневого насадка водой.

При переводе паровых котлов типа ДКВР с твердого топлива на газ и сохранении твердого топлива в качестве резервного необходимо сохранить слоевую топку с колосниковой решеткой, пневмомеханические забрасыватели (ПМЗ), бункера и другие устройства для подачи и сжигания твердого топлива. В этом случае на свободных боковых стенах топки устанавливают малогабаритные газовые горелки: горизонтальные щелевые с принудительной подачей воздуха для сжигания газа низкого давления или блочные инжекционные типа ВИГ с  $\alpha_1 > 1$  для газа среднего давления. Горелка БИГ (рис. 2.22) состоит из нескольких цилиндрических инжекционных смесителей, объединенных в общий блок с одним газораспределительным коллектором (газовой камерой).

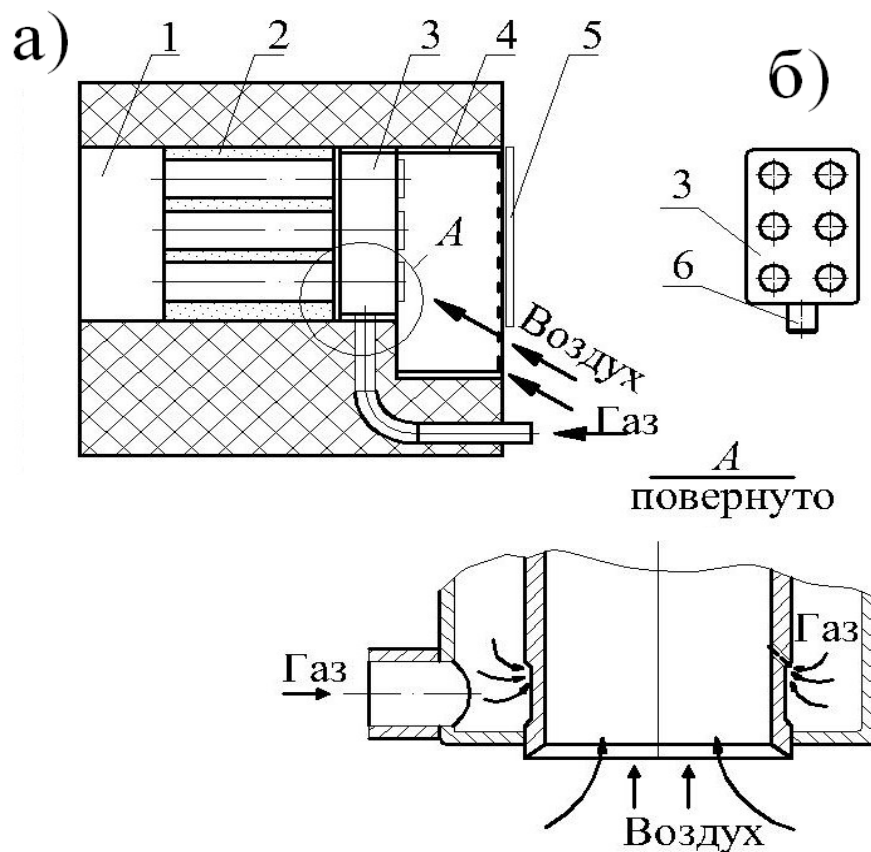


Рис. 2.22. Инжекционные горелки БИГ конструкции Промэнергогаза.

а) схема установки горелки; б) двухрядная горелка;

1 - стабилизирующий туннель; 2 - набивка из огнеупорной массы между элементами-смесителями; 3 - горелка; 4 - шумопоглощающая прокладка; 5 - шторка из прозрачного материала; 6- газопровод

Подвод газа в каждый смеситель (рис. 2.22, узел А) осуществляется четырьмя периферийными соплами. Горелки БИГ не имеют воздушных заслонок и обеспечивают полное сжигание газа в рабочем режиме при  $\alpha_1 = 1,02 \dots 1,05$ .

При работе котлов ДКВР на газе с резервным жидким топливом на фронте котла устанавливают комбинированные газомазутные горелки, например, типа ГМГм или ГМГБ-5,6. На рис. 2.23 представлена конструкция горелки типа ГМГм. Эта горелка состоит из газовой камеры, имеющей два ряда газовыпускных отверстий, направленных под углом  $90^\circ$  друг к другу, лопаточных завихрителей первичного и вторичного воздуха, паромеханической форсунки (см. рис. 1.8), монтажной плиты с устройством для установки запальной горелки.

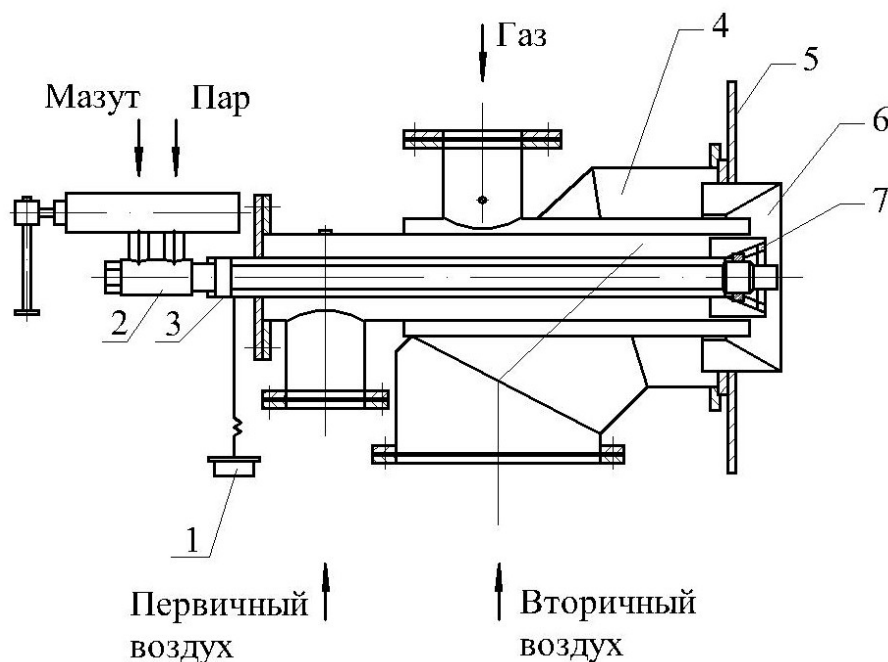


Рис. 2.23. Горелка ГМГм конструкции ЦКТИ:

1 – заглушка; 2 - паромеханическая форсунка; 3 – болт; 4 – газоздушная часть; 5 – монтажная плита; 6 - лопаточный завихритель вторичного воздуха; 7 - лопаточный завихритель первичного воздуха

Стабилизация пламени обеспечивается за счет рециркуляции части раскаленных продуктов сгорания в приосевой зоне факела в керамическом коническом туннеле.

Первичный воздух закручивается завихрителем тангенциально-аксиального типа (см. раздел 1.1) с прямыми лопатками, установленными под углом  $60^\circ$ , и подается к корню факела. По ходу вторичного воздуха имеется завихритель с прямыми лопатками, установленными под углом  $45^\circ$ . Закрутка первичного и вторичного воздуха - в одну сторону. Газ из газовыпускных отверстий подается в закрученные потоки воздуха, смешивается с ним, и сгорает в керамическом туннеле.

Горелка типа ГМГБ-5, 6, устанавливаемая на котлах типа ДКВР-20, предназначена для сжигания газа и мазута. Стабилизация пламени обеспечивается керамическим туннелем (рис. 2.24). В горелке установлена паромеханическая форсунка (см. рис. 1.8). Подача газа осуществляется струями с периферии в закрученный поток воздуха. Завихрителем воздуха служит набор профилирован-

ных лопастей с регулируемым углом наклона, что позволяет менять степень крутки. Воздух к горелке подается от общего для всех горелок воздушного ко-роба.

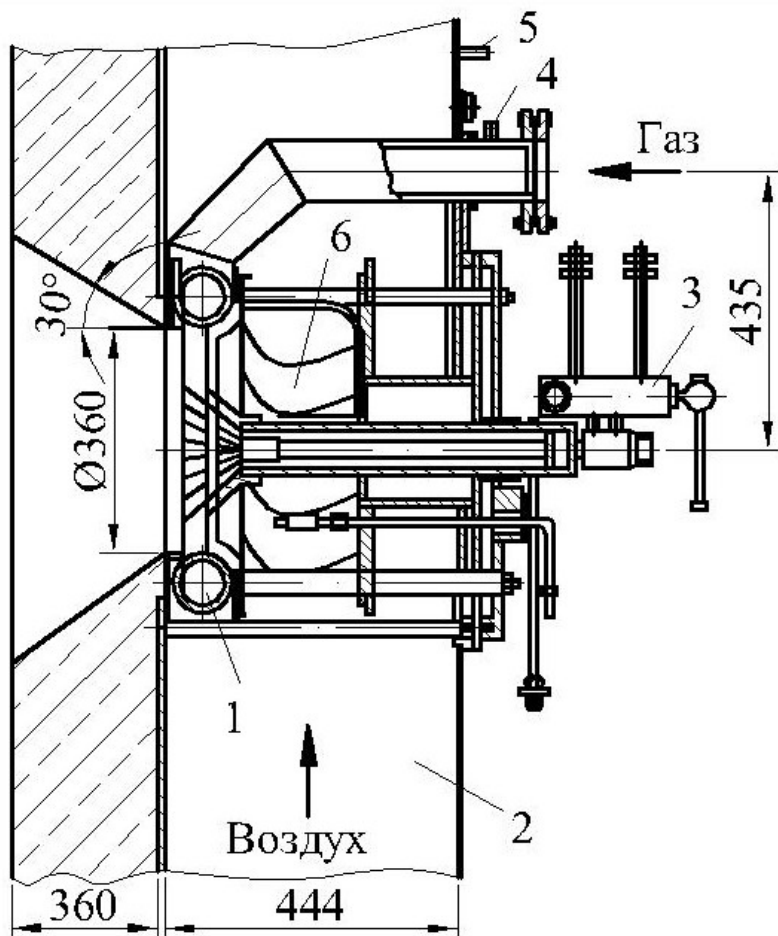


Рис. 2.24. Газомазутная горелка типа ГМГБ:

1 – кольцевой газораспределительный коллектор; 2 – воздушный короб; 3 – форсунка; 4, 5 – штуцера для измерения давления: 4 – газа, 5 – воздуха; 6 – лопаточный завихритель воздуха

Вертикально-водотрубные паровые котлы типа Е-1/9-1Г, вертикально-цилиндрические малометражные котлы типов Е-1-9Г и Е-0,4-9Г предназначены для работы на газовом топливе. Они оборудованы горелками типа Г-1,0 или Г-0,4. Горелка Г-1,0 с принудительной подачей воздуха имеет две трубы для подвода газа: основную (76x3,5 мм) и запальную, служащую для розжига и стабилизации горения. Конец основной трубы заварен заглушкой, а для выхода газа по периферии трубы имеются три (Г-1,0) или восемь (Г-0,4) рядов отверстий, т.е. это горелка с центральной струйной раздачей газа. Смешение газа с воздухом происходит предварительно внутри горелки и окончательно в расширяющемся конусе. При подаче высокого напряжения на запальный электрод между ним и корпусом горелки проскакивает искра, поджигающая газозвудушную смесь. При наличии пламени контрольный электрод подает сигнал на подачу

газа к основной трубе. Горение смеси начинается в расширяющемся конусе, стабилизация пламени обеспечивается постоянным пламенем запальной горелки и специальной шайбой (рис. 2.25).

На паровых котлах типа ДЕ установлены горелки типа ГМ или ГМП, предназначенные для отдельного сжигания природного газа и мазута. На рис. 2.26 представлена горелка ГМП-16 с камерой двухступенчатого сжигания топлива. Состоит она из газовой части и паромеханической форсунки, факел закручивается в правую сторону. Газовая часть горелки состоит из кольцевого коллектора прямоугольного сечения с одним рядом газовыпускных отверстий, через которые газ попадает в закрученный лопаточным завихрителем воздушный поток (периферийная струйная раздача газа). Форсуночный узел состоит из основной форсунки, расположенной на оси горелки, и резервной, установленной ниже под углом  $6^\circ$  к горизонтали. Резервная форсунка эксплуатируется кратковременно при ремонте основной. Около 70% общего расхода воздуха подается в качестве первичного, вторичный воздух подается через кольцевую щель в тангенциальный завихритель и обеспечивает дожигание топлива. Направление вращения первичного и вторичного воздуха одинаковы. Применение двухступенчатого сжигания сглаживает отличия газового и мазутного факелов за счет увеличения излучательной способности газового факела и снижает температурный уровень горения, вследствие чего уменьшается концентрация оксидов азота в дымовых газах.

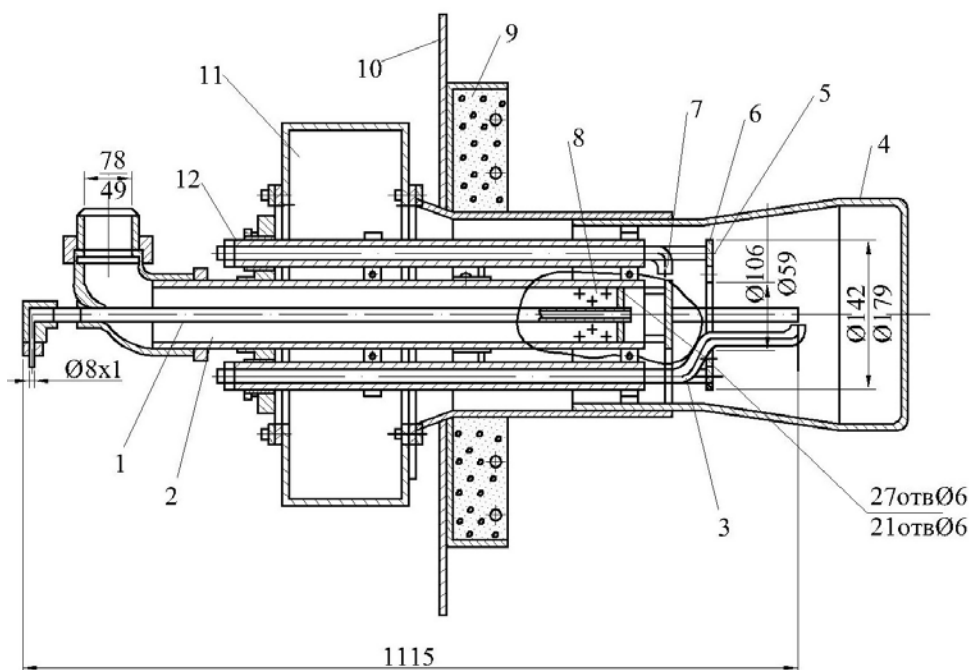


Рис. 2.25. Горелки Г-1,0 и Г-0,4:

1 – запальная труба; 2 – основная труба для подачи газа; 3 – контрольный электрод; 4 – конический смеситель; 5 – шайба для стабилизации факела горелки; 6 – стабилизирующий диск запальной горелки; 7 – электрод для розжига запальной горелки; 8 – газовыпускные отверстия; 9 – теплоизоляция; 10 – фронтальной лист; 11 – воздушный короб; 12 – фарфоровая изоляция запального и контрольного электрода

На водогрейных котлах типа ПТВМ устанавливаются горелки типа ДКЗ (рис. 2.27). Горелки вихревые однопоточные с аксиальным завихрителем воздуха. Стабилизация пламени осуществляется в цилиндрическом туннеле, изготовленном из шамотобетона (часть туннеля за головкой форсунки). Газ поступает в закрученный поток воздуха с периферии. Воздух к каждой горелке подается от автономного вентилятора. Форсунка - механическая.

В топках энергетических котлов высокого и СКД давления используются мазутные и газомазутные горелки, имеющие единичную производительность от 0,39 до 4,5 кг/с (от 1,0 до 16 т/ч) мазута или до 5 м<sup>3</sup>/с (18000 м<sup>3</sup>/ч) природного газа.

При таких значительных единичных мощностях особенно актуальны экономичность и надежность горелочных устройств, организация сжигания с минимальными образованиями вредных продуктов горения, особенно оксидов азота. Современные конструкции горелочных устройств в сочетании с рациональными способами их компоновки обеспечивают работу топочных устройств с исчезающе малыми значениями  $q_3$  и  $q_4$  и с генерацией  $NO_x$  значительно меньше ПДК.

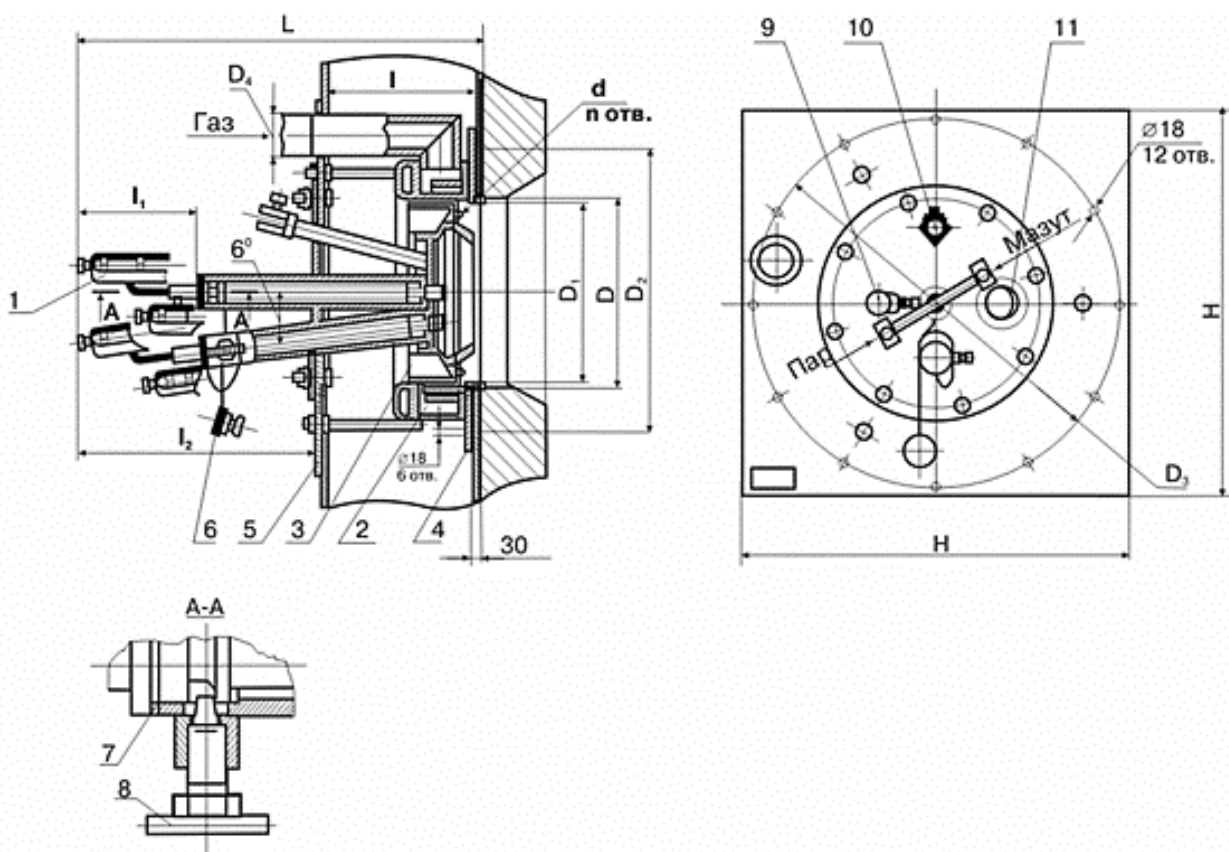


Рис. 2.26. Горелка ГМП-16:

1 – форсунка; 2 – газовый коллектор; 3 – лопаточный завихритель воздуха; 4 – опора; 5 – фланец; 6 – заглушка; 7 – прокладка; 8 – фиксатор; 9 – гляделка; 10 – место установки фотодатчика; 11 – место установки запальника

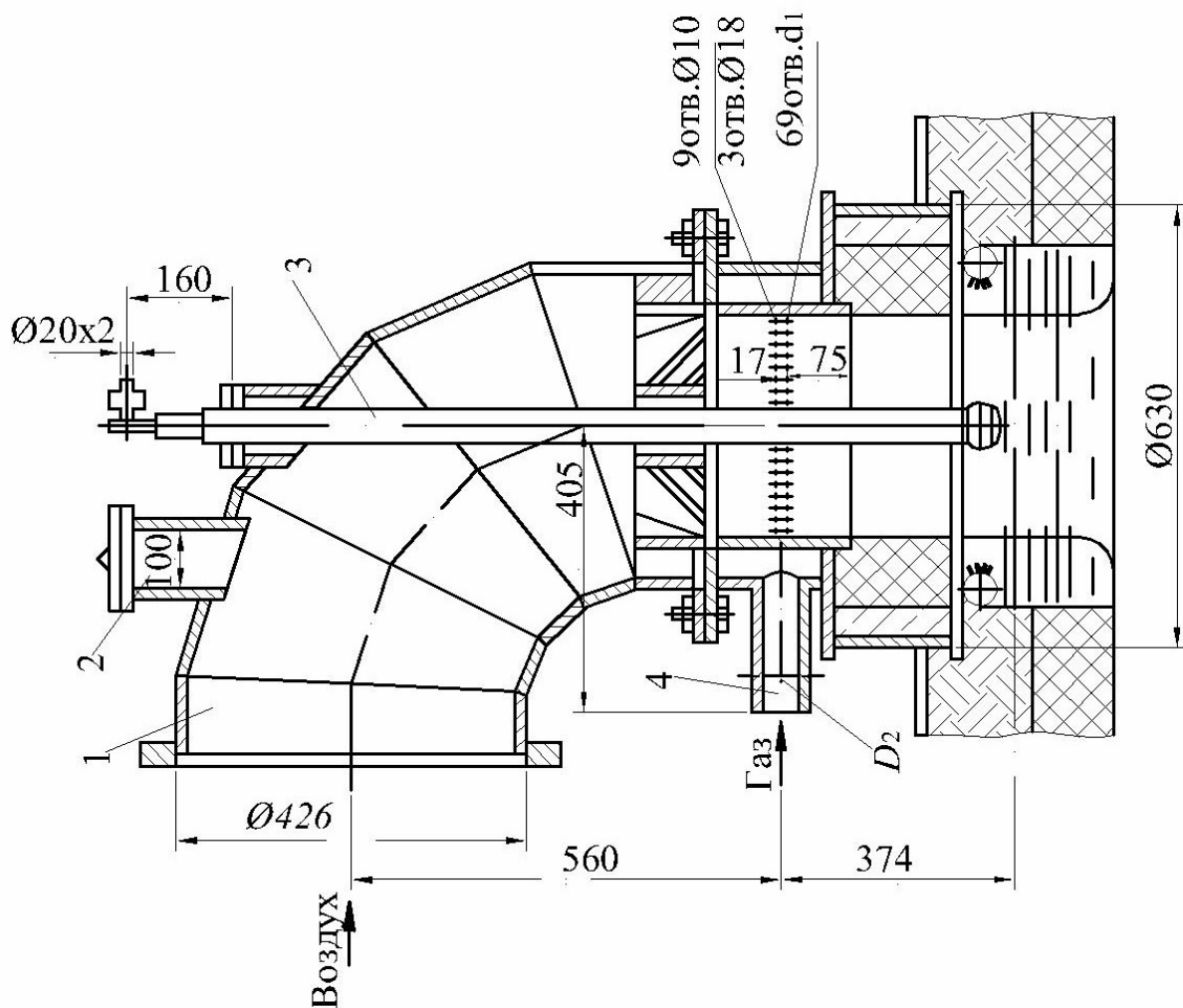


Рис. 2.27. Газомазутная горелка ДКЗ:

1 - короб; 2 - смотровое окно; 3 - мазутная форсунка; 4 - газовый патрубок

На рис. 2.28 приведена конструкция вихревой трехпоточной горелки для сжигания природного газа или мазута во встречных струях. Подача газа в воздушный поток осуществляется через отверстия из периферийного коллектора 3 и трубы 4, а также из патрубков 2. Мазут распыливается форсункой 5. Эффективность сжигания жидкого топлива обеспечивается многократным дроблением капель. Интенсификация смешения достигается последовательным воздействием концентрических воздушных потоков с возрастающими динамическими воздействиями: в центральном потоке скорость воздуха (первичного) должна быть не менее 30 м/с, а в каждом последующем потоке скорость воздуха должна возрастать на 10...20% относительно скорости предыдущего потока. Это способствует дополнительному дроблению капель мазута.

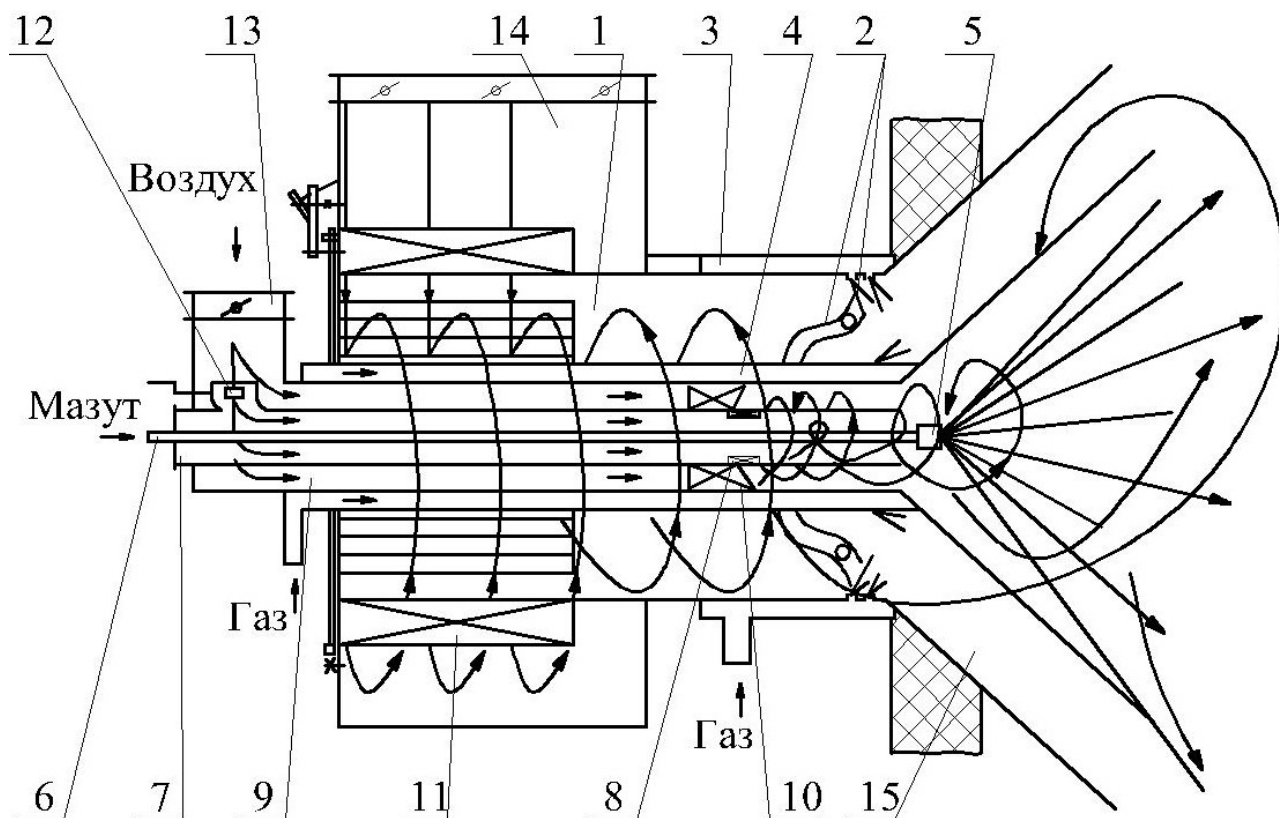


Рис. 2.28. Горелка ХФ ЦКБ НПО «ЭНЕРГОРЕМОНТ» - ВТИ – ТКЗ:

1 – основной (третичный воздух; 2 – струйная раздача газа; 3 – периферийный газовый коллектор; 4 – труба для подачи газа; 5 – форсунка; 6 – ствол подачи мазута; 7 – первичный воздух; 8 – закручивающий регистр; 9 – вторичный воздух; 10 – аксиальный завихритель вторичного воздуха; 11 – улиточно-тангенциальный завихритель основного воздуха; 12, 13, 14 – регулирующие шиберы (12 – первичного, 13 – вторичного, 14 – основного воздуха); 15 - амбразура

На рис. 2.29 показан вариант подовой горелки. Подача воздуха трехпоточная: через центральный канал и завихрители. Подача газа центральная, в поток воздуха газ подается через отверстия и патрубки. Горение топливо-воздушной смеси начинается на выходе из амбразуры.

Для качественного сжигания природного газа и мазута в широком диапазоне нагрузок (100...45%) с предельно малыми избытками воздуха используются горелки встречно-ударного действия (на котлах энергоблоков 300, 800 МВт). Конструкция такой горелки показана на рис. 2.30. Воздух подается прямооток через каналы 4, 5, 6, часть воздуха закручена завихрителем 3, скорость воздуха в амбразуре - 60 м/с. Для обеспечения широкого диапазона регулирования без отключения горелок на котле один из воздушных каналов (4) отключается. Производительность форсунки 6 т/ч (1,67 кг/с) по мазуту.



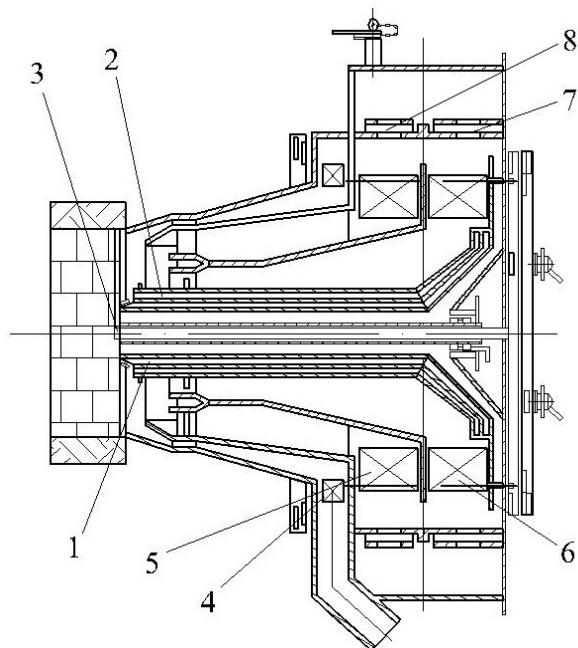


Рис. 2.29. Газомазутная подовая горелка  
ХФ ЦКБ НПО "ЭНЕРГО-РЕМОНТ"-ВТИ:

1, 2- центральный канал подачи газа (1- основной, 2- регулировочный); 3- паромеханическая форсунка; 4- тангенциальный завихритель газов рециркуляции; 5, 6- тангенциальные завихривающие аппараты (5- третичного, 6- вторичного воздуха); 7, 8- регулирующие кольцевые шиберы (7- первичного и вторичного воздуха, 8- третичного воздуха)

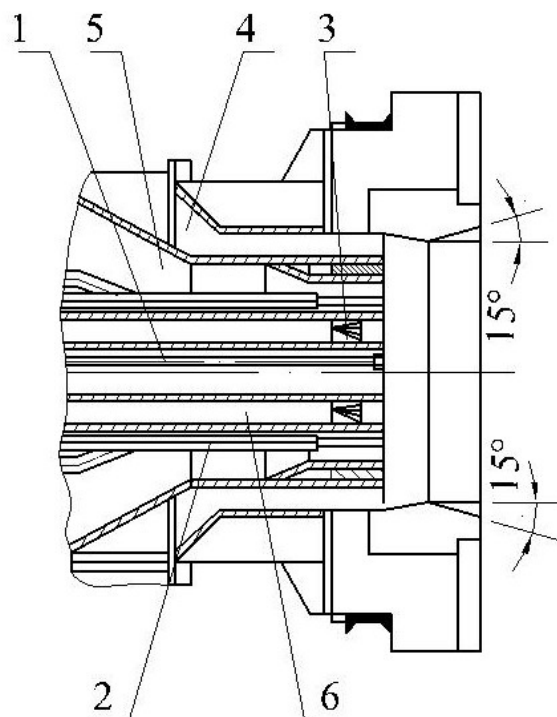


Рис. 2.30. Горелка встречно-ударного действия ВТИ-ТКЗ:

1 –паромеханическая форсунка; 2 - газовый патрубок; 3 - завихритель; 4 - наружный отключаемый воздушный канал; 5 - периферийный воздушный канал; 6 - центральный канал

### 3. РАБОТА ГАЗОМАЗУТНЫХ ТОПОЧНЫХ УСТРОЙСТВ

#### 3.1. Организация топочного процесса

Для сжигания жидкого или газообразного топлива чаще всего используется топочная камера в виде четырехгранной призмы, ориентированной горизонтально (в котлах малой и средней мощности) или вертикально (в котлах средней и большой мощности). Надежность топочного устройства и экономичность и надежность процесса горения находятся в неотделимой взаимосвязи. При этом работа топочной камеры котла должна удовлетворять определенным требованиям:

- максимальный химический недожог на выходе из топки не должен превышать 1...3%, а механический - 0,5%;
- сжигание топлива, содержащего серу, должно производиться с малым избытком воздуха ( $\alpha = 1,02 \pm 0,01$ ); при этом должны отсутствовать присосы воздуха в топку;
- температура на выходе из топки не должна превышать 1050...1200°C, неравномерность температурного поля по ширине топки не должна быть более  $\pm (10...15\%)$ ;
- локальные тепловые потоки не должны превышать значений, допустимых по условиям надежности экранных поверхностей нагрева;
- факел должен располагаться во всем объеме топочной камеры (степень заполнения близка к единице), но без касаний и ударов о поверхности нагрева;
- организация сжигания и развитие факела в топочной камере не должны способствовать загрязнению поверхностей нагрева;
- топочное устройство должно иметь минимальное количество горелок.

Выполнение перечисленных требований возможно только при условии соответствия профиля и габаритов топочной камеры характеристикам факела (системы факелов) и схеме компоновки применяемых горелок.

По условиям смесеобразования в горящем факеле топочная камера может быть разделена на две зоны. В качестве критерия такого деления предлагается структура поля скоростей в топочной камере. В первой зоне поле скоростей имеет значительные локальные неравномерности, что обусловлено горением несмешивающихся факелов отдельных горелок. Во второй зоне, эти неравномерности незначительны, что объясняется накладкой факелов отдельных горелок, их взаимодействием (рис. 3.1).

Размер первой зоны зависит в основном от конструкции горелок и параметров их работе (скорости воздуха, давления топлива, степени турбулизации потока и т.п.). Размер второй зоны зависит от компоновки горелок, габаритов и конфигурации топки. Соотношение относительных размеров этих зон оказывает влияние на качество сжигания и надежность топочной камеры. Интенсивность перемешивания, определяющая полноту сгорания, как правило, выше в первой зоне. Значительное влияние на соотношение размеров зон оказывают

тепловые напряжения топочного объема  $q_v = \frac{BQ_H^p}{V_T}$  и сечения топки

$q_F = \frac{BQ_H^p}{F_T}$ . Тепловое напряжение топочного объема  $q_v$  определяет время пребывания реагирующих компонентов, а тепловое напряжение сечения топки  $q_F$  - переносную скорость газов и степень турбулентного перемешивания в объеме топки.

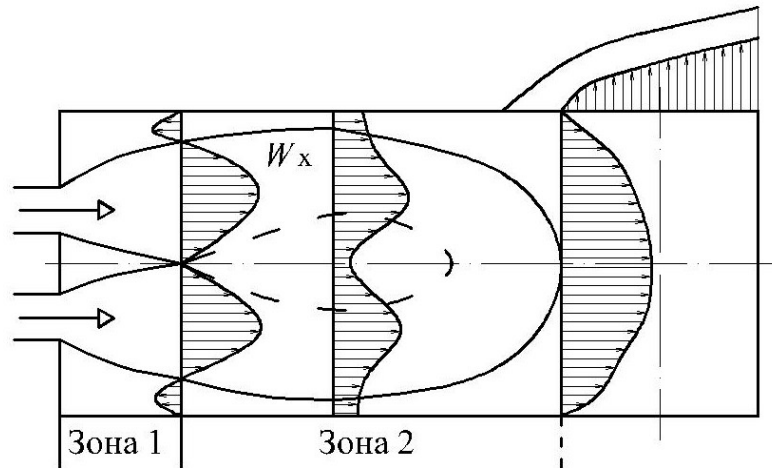


Рис. 3.1. Взаимодействие факелов в горизонтальной топке котла

При увеличении  $q_v$  относительный размер первой зоны сокращается, при уменьшении - возрастает и в пределе может распространиться на всю длину топочного объема. В последнем случае факелы каждой горелки развиваются независимо друг от друга, что благоприятно сказывается на полноте выгорания топлива, однако при этом возрастает длина общего факела, которую можно для данного случая оценить по (2.32), увеличиваются габариты и материалоемкость топки. Завышенные значения  $q_v$  приводят к недопустимому недожогу топлива, загрязнению и коррозии экранных и конвективных поверхностей. Расчет оптимальных значений  $q_v$  затруднителен; рекомендуемые значения  $q_v$  для разных топлив и топочных устройств приведен в [11].

Тепловое напряжение топочного объема связано с тепловым напряжением отдельной горелки. Объем горящего факела

$$V_{\phi} = \frac{S_{\phi} l_{\phi}}{w_{см}}, \quad (3.1)$$

где  $S_{\phi}$  - поперечное сечение факела;  $l_{\phi}$  - его длина,  $w_{см}$  - скорость топливовоздушной смеси. Так как  $S \sim B$ , а  $l_a \sim B^m$  (см. раздел 1.3), то

$$V_{\phi} = \frac{B^{m+1}}{w_{cm}}, \quad (3.2)$$

а тепловое напряжение факела

$$q_{v\phi} \sim \frac{w_{cm}}{B^m}. \quad (3.3)$$

Отсюда следует, что тепловое напряжение факела отдельной горелки уменьшается при прочих равных условиях пропорционально производительности горелки в степени  $m$  (см. рис. 1.27). Увеличение скорости  $w_{cm}$  приводит к повышению  $q_{v\phi}$ . Распространяя эти положения на топку в целом можно сказать, что при увеличении мощности топочного устройства для сохранения его экономичности и надежности необходимо уменьшать  $q_v$  при соответствующем увеличении  $q_F$ . Это положение справедливо при сохранении вида и характеристик сжигаемого топлива. При переходе на сжигание другого топлива необходимо уменьшать  $q_v$ , если у него большое время индукции  $\tau_{инд}$ , и можно увеличивать  $q_v$  при меньшем  $\tau_{инд}$  замещающего топлива. Так, при переходе с твердого топлива на газообразное  $q_v$  может быть увеличено в 3...4 раза без конструктивных изменений топки, мощность топки при этом возрастает на 30...50% без ухудшения ее надежности и экономичности горения.

Надежность топочной камеры зависит также от местоположения максимума тепловыделения. Известно, что около 80...90% топлива выгорает примерно на 50% длины факела, т.е. максимальные тепловые потоки находятся в первой смесеобразовательной зоне топки. Допустимое значение локальных тепловых потоков определяется максимальной допустимой температурой металла экранных поверхностей топки, солесодержанием циркулирующей в экранах смеси (энтальпией среды в прямоточных и СКД котлах) и скоростью ее движения. Следует отметить также, что с ростом локальных тепловых потоков возрастает генерация  $NO_x$  [2]. В любом случае снижение локальных тепловых потоков, равномерное распределение тепловыделения факела по длине (высоте) топки способствуют более надежной ее работе. Наилучшим с этой точки зрения является прямоточный факел, но при его использовании возрастают габариты топки. Применение вихревых горелок позволяет уменьшить длину факела  $l_{\phi}$  и размеры топочной камеры, однако при этом увеличивается  $q_F$ , а зона максимального тепловыделения приближается к устью горелки. При сжигании мазута она располагается на расстоянии около  $0,3 l_{\phi}$  от устья горелки и  $0,15 l_{\phi}$  - при сжигании газа. Центр зоны максимального тепловыделения факела ортогонально проектируется на экранные поверхности, а радиус максимальных тепловых потоков на экраны может быть определен из выражения

$$R_q = 0,25B \quad (3.4)$$

где  $B$  - производительность горелки, т/ч.

При установке вихревых горелок возрастает интенсивность перемешивания в первой зоне топки. Одной из задач топочного устройства является поддержание этой интенсивности по всей длине (высоте) топки. В значительной мере это достигается компоновкой горелок и конструкцией топочной камеры.

Другим фактором, оказывающим влияние на процессы смесеобразования в топочном устройстве под разрежением, являются неорганизованные присосы воздуха. Присосы в топке достигают 10...15% ( $\Delta\alpha = 0,1...0,15$ ), а по всему тракту котла - до 30...45%. Подача организованного воздуха через горелки уменьшается вследствие наличия присосов, смесеобразование ухудшается, т.к. присосный воздух в горении участвует неэффективно. К тому же наличие присосного воздуха снижает резервы по тяге дымососов, вследствие чего даже при незначительных загрязнениях поверхностей нагрева возникает недостаток тяги, что отрицательно сказывается на работе топки. При избытке воздуха на выходе из топки  $\alpha_T = 1,02...1,03$  и присосах в топку  $\Delta\alpha_T = 0,1...0,13$  подача организованного воздуха снижается до  $\alpha \approx 0,9$ , что нарушает нормальную работу горелок, приводит к росту длины факела и повышенному сажеобразованию. Поэтому снижать организованную подачу воздуха ниже  $\alpha = 0,97...1,0$  не рекомендуется, т.е. надежное и экономичное горение в топках котлов может быть обеспечено только при хорошем уплотнении топки и газового тракта.

### 3.2. Компоновка горелочных устройств

Для котлов с горизонтальной ориентацией топки наиболее характерной является фронтальная компоновка горелок на передней стенке. С точки зрения надежности наилучшим вариантом является установка в горизонтальной топке одной горелки. При установке двух горелок оптимальным вариантом является компоновка их одна над другой. Для этих вариантов компоновки наиболее эффективно применение прямоточных или прямоточно-завихрывающих горелок. При одногорелочной компоновке положение максимума излучения прямоточного факела сдвигается вглубь топки, что приводит к уменьшению численного значения максимальных тепловых потоков на экраны. В случае двухгорелочной компоновки такой же эффект в длинной горизонтальной топке достигается затягиванием процесса горения накладкой факелов.

Для варианта компоновки двух вихревых горелок необходимо учитывать взаимодействие закрученных струй. Односторонняя закрутка потоков (рис. 3.2б) снижает тангенциальную составляющую скорости потока в межгорелочной зоне и вызывает асимметрию факела. При противоположной закрутке (рис. 3.2а) в межгорелочной области отсутствуют нулевые скорости и факел почти не отклоняется. В зоне накладок факелов их скорости суммируются, вследствие чего активизируется процесс горения и уменьшается неравномерность тепловых потоков на стены топки. Рекомендуемая установка таких горелок приведена на рис. 3.2а.

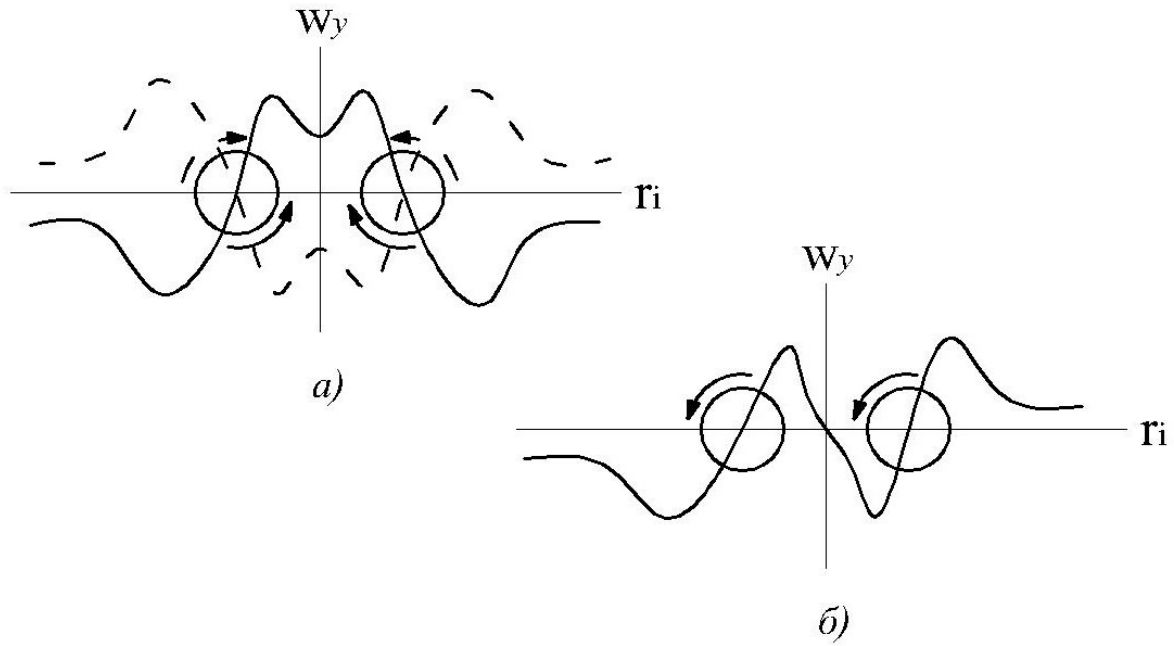


Рис. 3.2. Взаимодействие закрученных струй вихревых горелок:  
 а) противоположная закрутка струй; б) односторонняя закрутка струй

На котлах с вертикальной топочной камерой наибольшее распространение получили однофронтная, встречная, тангенциальная и подовая компоновка горелок (рис. 3.3).

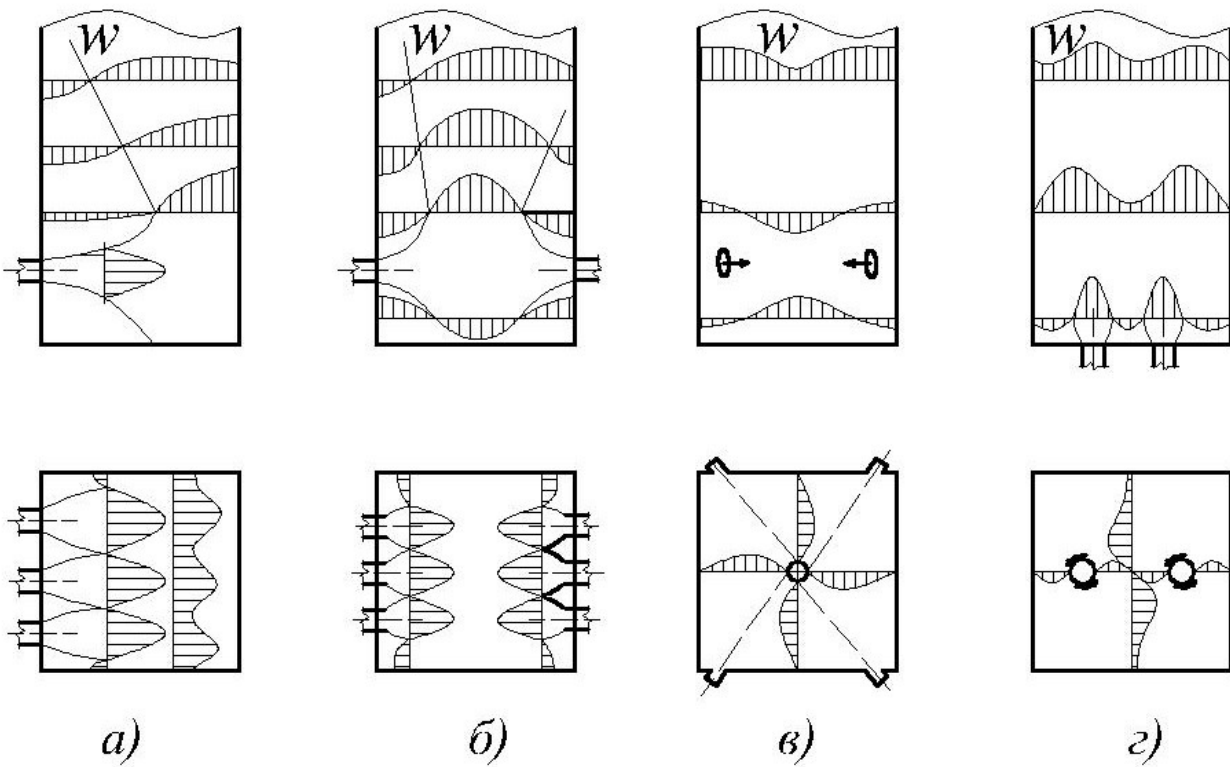


Рис. 3.3. Компоновка горелок:  
 а) - фронтная; б) - встречная лобовая (ударная);  
 в) - угловая тангенциальная; г) - подовая;  $w$  - скорость потоков

При фронтальной компоновке горелочные устройства монтируются на передней стенке топки в один или несколько ярусов. Расстояние между осями соседних горелок яруса, от осей крайних горелок до стен топки, а также между ярусами горелок принимается не менее  $2,5 D_{гв}$ ; расстояние от нижнего яруса горелок до подачи топки - также не менее  $2,5 D_{гв}$ . При более тесной компоновке возрастает взаимодействие соседних горелок, при этом факел становится длиннее, возрастают неполнота сгорания и температура газов на выходе из топки. Длина горизонтальной и вертикальной составляющих общей длины факела определяется в соответствии с (1.26) и (1.27). Глубину топочной камеры следует принимать на 5...10% больше  $l_{фг}$ ; высоту камеры от отметки осей верхнего яруса горелок рекомендуется принимать не менее чем на 5...10% больше  $l_{фв}$  при фронтальной и встречной компоновке горелок и на 5% - при тангенциальной. Преимущества однофронтальной компоновки горелок: простая система подвода воздуха к горелкам, удобство их обслуживания; недостатки: сложность достижения равномерного распределения воздуха по отдельным горелкам, возможность касания факелом противоположной стенки (экранов), неравномерность заполнения топочного объема факелами.

Встречная компоновка характеризуется интенсивным взаимодействием факелов, при соударении факелов повышается турбулентность потока, что интенсифицирует процесс горения. Недостатки такой компоновки: неравномерность избытка воздуха и температуры газов по ширине топки на выходе из неё, необходимость и сложность равномерной раздачи воздуха и топлива на фронтальную и заднюю группу горелок, а также по ширине топки.

При тангенциальной компоновке оси горелок, монтируемых по углам топки, направляются по касательной к воображаемой окружности (в центре топки) с радиусом  $r = (0,2...0,3)R$ , где,  $R$  – радиус окружности, вписанной в план топки квадратного сечения. Рекомендуется устанавливать не менее двух ярусов горелок, в каждой из которых закручивается 25...30% всего количества подаваемого воздуха. При снижении нагрузки котла следует отключать встречно расположенные пары горелок по ярусам. Нарушение этого правила приведет к перекоосу общего факела.

При тангенциальной компоновке наблюдается хорошее заполнение факелом топочного объема, температурное поле в сечениях топки равномерное (рис. 3.4), а эффективное перемешивание потоков в поперечном сечении топки повышает интенсивность и качество горения, а также и  $q_v$  при прочих равных условиях. В конце топки более низкая средняя температура, что говорит о более высоком тепловосприятии экранов по высоте топки.

К достоинствам тангенциальной компоновки относится также снижение требований к точности распределения воздуха и топлива по отдельным горелкам. Если при фронтальной и встречной компоновках при сжигании топлива с  $\alpha = 1,03$  точность распределения должна быть около 5%, то при тангенциальной - отклонение распределения может достигать 20...25% даже при минимальных избытках воздуха. Недостатками такой компоновки являются сложность конст-

рукции и обслуживания топливоздушной системы, а также наличие значительных тепловых потоков в поясе горелочных устройств.

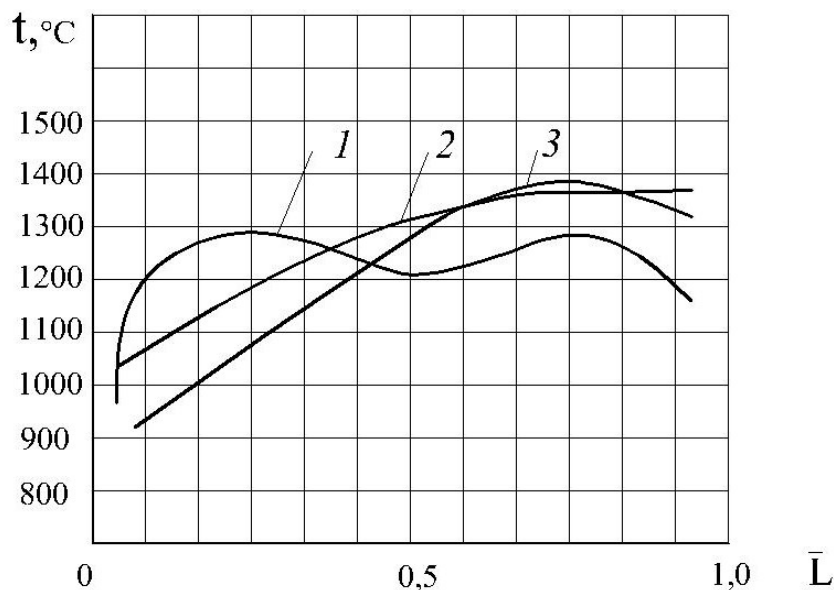


Рис. 3.4. Распределение температуры на выходе из топки при различной компоновке горелок:  
1 - тангенциальной; 2 - фронтальной; 3 - встречной

Подовая компоновка по организации смесеобразования и характеристикам горения мало отличается от фронтальной или встречной. Однако особенности сжигания топлива и теплообмена в топке, присущие такой компоновке, способствуют все более широкому её применению. Достоинства подовой компоновки: возможность применения меньшего количества комбинированных горелок большей мощности; например, на котле типа ТГМ-204П установлено двенадцать подовых газомазутных горелок вместо тридцати шести при встречной их компоновке; ядро горения (зона максимальных тепловых потоков) располагается в части топки, где энтальпия водопаровой среды относительно невысока, что повышает надежность экранных труб; локальные тепловые нагрузки снижены за счет наложения факелов и затягивания процесса горения; горение происходит без химнедожога при минимальных избытках воздуха ( $\alpha < 1,02$ ); более эффективное (на 15...20%) заполнение факелом топочного объема. Недостатком подовой компоновки является необходимость иметь дополнительное пространство для установки и обслуживания горелочных устройств, располагаемых ниже пода, что приводит к увеличению общей высоты котла.

Процесс смесеобразования в конце горящего факела и на выходе из топки в значительной степени затруднен вследствие расслоения потока, особенно в котлах с П - образной компоновкой: факел перемещается к заднему экрану, температура газового потока в сечении возрастает к заднему экрану, а избыток кислорода - к переднему. Причина такого явления заключена в особенностях горячей аэродинамики в поворотной камере газохода: наименее нагретые (наиболее плотные) объемы газов отжимаются при движении в сторону большего



радиуса поворота, наиболее нагретые движутся по траекториям меньшей кривизны; температура выше у той части потока, где активнее протекает горение, поэтому в ней содержится меньшее количество непрореагировавшего кислорода.

Расслоение потока не сказывается на работе топки при  $\alpha \geq 1,08$ , но при меньших значениях избытка воздуха факел может затягиваться в конвективные поверхности нагрева. Для устранения явления расслоения потока используется подача вторичного воздуха через сопла, установленные в верхней части заднего фронта котла или верхняя часть заднего фронта выполняется с выступом внутрь топки («носом»), который перекрывает 20...30% выходного сечения топки. Однако наиболее радикальной мерой борьбы с этим явлением следует считать применение тангенциальной компоновки горелочных устройств.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кузнецов, Н.М. Топливо. Материальный баланс процесса горения: учеб. пособие / Н.М. Кузнецов, Е.А. Блинов, А.Н. Кузнецов. - Л.: СЗПИ, 1989. - 86 с.
2. Кузнецов, Н.М. Основы теории топочных процессов: учеб. пособие / Н.М. Кузнецов, Е.А. Блинов. - Л.: СЗПИ, 1990. - 70 с.
3. Теория топочных процессов / под ред. Г.Ф. Кнорре, И.И. Палеева. - М. - Л.: Энергия, 1966. - 492 с.
4. Ахмедов, Р.Б. Дутьевые газогорелочные устройства / Р.Б. Ахмедов. - М.: Недра, 1977. - 272 с.
5. Павлов, В.А. Условия оптимизации процессов сжигания жидкого топлива и газа в энергетических и промышленных установках / В.А. Павлов, И.Н. Штейнер. - Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 120 с.
6. Адамов, В.А. Сжигание мазута в топках котлов / В.А. Адамов. - Л.: Недра, 1989. - 304 с.
7. Карабин, А.И. Сжигание жидкого топлива в промышленных установках / А.И. Карабин, Е.С. Раменская, И.К. Энно. - М.: Металлургия, 1966. – 372 с.
8. Аэродинамика закрученной струи / под ред. Р.Б.Ахмедова. - М.: Энергия, 1977. - 240 с.
9. Правила безопасности систем газораспределения и газопотребления: ПБ-12-529-03. – М.: Изд-во ЦОТГБСП, 2003. – 190 с.
10. Стаскевич, Н.Л. Справочник по газоснабжению и использованию газа / Н.Л. Стаскевич, Г.Н. Северинец, Д.Я. Вигдорчик. - Л.: Недра, 1990. - 762 с.
11. Тепловой расчет котлов: нормативный метод. - СПб.: Изд-во НПО ЦКТИ, 1998. – 257 с.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

### Приложение 1

#### Оценка соответствия характеристик горелок условиям их эксплуатации

Основным критерием работоспособности горелки при переходе на сжигание газа с другими характеристиками (состав,  $Q_H^p$ ) является постоянство числа Воббе, т.е.

$$W_{H1} = W_{H2}$$

или

$$\frac{Q_{H1}^p}{\sqrt{\frac{c_{T1}}{c_2}}} = \frac{Q_{H2}^p}{\sqrt{\frac{c_{T2}}{c_B}}};$$

здесь индексом 1 обозначены характеристики газа, для сжигания которого рассчитана горелка, индексом 2 – нового газа.

Равенство чисел Воббе или их различие в пределах  $\pm 5\%$  позволяет использовать новый газ без внесения каких-либо изменений в конструкцию горелки. При разнице чисел Воббе в пределах 5...7% допустимо использовать существующую горелку, но необходимо изменить давление нового газа перед горелкой, численное значение которого можно определить, используя расширенное число Воббе

$$W_{H \text{ расш}} = \frac{Q_{H1}^p \sqrt{p_1}}{\sqrt{\frac{c_{T1}}{c_B}}} = \frac{Q_{H2}^p \sqrt{p_2}}{\sqrt{\frac{c_{T2}}{c_B}}};$$

для горелок с принудительной подачей воздуха

$$p_2 = \frac{p_1 c_{T2}}{c_{T1}} \left( \frac{Q_{H1}^p}{Q_{H2}^p} \right)^2.$$

Давление воздуха при этом можно не менять, так как расход воздуха прямо пропорционален, а расход газа обратно пропорционален теплоте сгорания газа.

При большем отклонении числа Воббе нового газа от расчетного необходим перерасчет горелки с изменением диаметра газовыпускных отверстий и давления газа. На реконструированную горелку не могут распространяться характеристики, полученные при государственных испытаниях исходной горелки.

## Горелки и форсунки

<i>Горелки</i>	<i>Сжигание топлива</i>	<i>Область использования</i>	<i>Тепловая мощность, кВт (при <math>Q_n = 34,5</math> <math>мДж/м^3</math>, <math>\rho = 0,7 кг/м^3</math>)</i>
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
<i>Диффузионные горелки</i>			
1. Горелка многотрубная	Природный газ	Бытовые проточные водонагреватели	24...25,6
2. Горелка однотрубная ПГ-Н конструкции Укрнииинжпроекта	Природный газ	Секционные котлы, сушилки	49,4...741
3. Горелка ГРЦ конструкции ВНИИпромгаза	Природный газ	Вращающиеся печи промстройматериалов	24,6...138,4
<i>Инжекционные горелки с <math>\alpha &gt; 1</math></i>			
1. Горелки В и ВП конструкции Стальпроекта	Природный, коксовые газы и их смеси	Нагревательные и термические печи	11,9...690
2. Горелки ИУ $\frac{d_{нг}}{d_{гс}}$ и УИ $\frac{d_{нг}}{d_{г}}$ ПС конструкции Стальпроекта	Сжиженные углеводородные газы (СУГ), природный, коксовый газ и их смеси	В теплоагрегатах при невозможности установки туннель-стабилизатора	9,8...540
3. Горелка ИГК конструкции Мосгазниипоекта	Природный газ	Чугунные секционные котлы	78...2200
4. Горелки БИГ конструкции Ленгипроинжпроекта и Промэнергогаза	Природный газ	Котлы, теплоагрегаты под разрежением	96...2302
5. Горелки инфракрасного излучения (ГИИ)	СУГ, природный газ	Тепловая обработка изделий и материалов, локальный обогрев рабочих мест, отопление производственных и коммунально-бытовых помещений	1,92...4,48...6,4... 9,3

1	2	3	4
6. Горелки беспламенные панельные ГБШ конструкции ВНИИ-нефтемаша	Природный газ	Трубчатые печи нефтехимической, газовой промышленности	52,4...308
<i>Инжекционные горелки с <math>\alpha &lt; 1</math></i>			
1. Горелка для проточных водонагревателей	СУГ, природный газ	Варочные котлы, дистилляторы, кипятивники, водонагреватели, стиральные машины	20,9
2. Горелки для автоматических водонагревателей АГВ-80 и АГВ-120	СУГ, природный газ	В любых установках, подходящих по тепловой мощности	7; 14
3. Горелка Мосгазниипроекта	СУГ, природный газ	Отопительные секционные котлы типа ВНИИСТО-М	13,8...30,7
4. Многофакельная горелка ГИ-Н конструкции Укргипроинжпроекта	Природный газ	Секционные котлы и др. теплоагрегаты, имеющие топку продольной формы	16,8...104,8
5. Многофакельная горелка ГКС конструкции Мосгазниипроекта	СУГ, природный газ	Для топок продольной формы	18,7...60,2
6. Горелка конструкции Ленгинпроинжпроекта	Природный газ	Секционные котлы	83...130
7. Горелки ГГИ конструкции Мосгазниипроекта	СУГ, природный газ	Плиты, пищеварочные котлы предприятий общественного питания, хлебопекарные печи, сушила	23,3...116
8. Горелки ИА конструкции Стальпроекта	Природный газ, смешанный газ ( $Q_H = 75 \text{ МДж/см}^3$ )	Колпаковые печи металлургических заводов	61...149

1	2	3	4
9. Переносные запальники конструкции Ленгипроинжпроекта	Природный газ	Розжиг основных горелок котлов, печей и др. установок, работающих на СУГ или природном газе	2,3...15,23 для топок с разрежением до 50 Па или противодавлением до 25 Па
10. Инжекционная переносная горелка	СУГ, природный газ	Местный нагрев небольших изделий из стали для пайки, лужения, обжига краски, опаливания туш животных и т.п.	23,3; 32,6
11. Ручная инжекционная горелка	СУГ	То же	14
<i>Газовые горелки с принудительной подачей воздуха</i>			
1. Горелки ГНП конструкции Теплопроекта	СУГ, природный газ, искусственные горючие газы	Нагревательные и термические печи, сушила, туннельные печи промстройматериалов	72,8...2970
2. Плоскопламенные горелки ГПП конструкции Института газа АН УССР и Теплопроекта	Природный газ	Промышленные печи	198...985
3. Горелки ГА конструкции Мосгазниипроекта	Природный газ	Котельные установки	395...10870
4. Горелки ГГВ конструкции Мосгазниипроекта	Природный газ	Котлы, промышленные печи, сушила	115...8660
5. Газомазутная горелка конструкции Ленгипроинжпроекта	Природный газ, мазут	Котлы паровые производительностью от 2,5 до 20 т/ч	1074...8200
6. Горелки ГМГм конструкции НПО ЦКТИ им. И.И.Ползунова и завода «Ильмарине» (форсунка-паромеханическая)	Природный газ, мазут	Котлы типа ДКВР	1570...5820

1	2	3	4
7. Горелки ГМ и ГМП конструкции НПО ЦКТИ им. И.И.Ползунова и завода «Ильмарине» (форсунки-паромеханические)	Природный газ, мазут	Паровые котлы типа ДЕ	2900...18600
8. Горелка ГМГБ-5.6 конструкции завода «Ильмарине» (форсунка-паромеханическая)	Природный газ	Паровой котел типа ДКВР-20	6515
9. Горизонтальные щелевые горелки (иначе подовые) типа ПГОД-С конструкции ИГАН УССР и Монастырищенского машиностроительного завода	Природный газ	Котлы типа ТВГ и КВ-Г	986...2767
10. Горелки горизонтальные (подовые) двухтрубные конструкции Ленгипроинжпроекта (неунифицированные)	Природный газ	Котлы типа МГ-2 Котлы типа «Энергия-6» Котлы типа «Тула-1» Котлы типа «Тула-3» Котлы типа «отопитель-1» Котлы типа Э5-Д2	535...989 453...874 612...1114 450...867 540...998 981...979
11. Вертикальные щелевые горелки конструкции Ленгипроинжпроекта	Природный газ	Котлы типа ДКВ и ДКВР	1021...2633
12. Газогорелочный автоматизированный блок Л1-Н конструкции НИИсантехники	Природный газ	Отопительные водогрейные котлы мощностью 1 МВт	418; 1080
13. Горелки типа Г-0,4 и Г-1,0 конструкции НПО ЦКТИ им. И.И.Ползунова и завода «Ильмарине»	Природный газ	Котлы типа: Е-0,4-9Г (МЗК-8Г); Е-1-9Г (МЗК-7АГ); Е-1/9-1Г (ММЗ-1Г)	437 (Г-0,4), 1117 (Г-1,0)



1	2	3	4
14. Газомазутная горелка типа ДКЗ конструкции ВТИ (форсунка – механическая центробежная)	Природный газ, мазут	Водогрейные котлы типа: ПТВМ-30 М ПТВМ-50 ПТВМ-100	4900...5800, 7000
15. Газомазутная горелка РГМГ конструкции НПО ЦКТИ им. И.И.Ползунова, Белгородского котлостроительного завода и «Ильмарине» (форсунка - механическая ротационная); РГМГ-7М РГМГ-10 РГМГ-20 РГМГ-30	Природный газ, мазут	Водогрейные котлы типа:  КВГМ-6,5; АПВ-2; АВ-2 КВГМ-10 КВГМ-20; КВГМ-50 КВГМ-30; КВГМ-100	8200 11600 23200 34800
16. Газомазутные горелки Белгородского котлостроительного завода (форсунки – механические)	Природный газ, мазут	Паровые котлы типа: БК БК-35М, Котлы производительностью от 25 до 75 т/ч, в том числе: ГМ-50-14/250; ГМ-50-1; БКЗ-75-39ГМА	5090...12290 7680  2880...7200
17. Многощелевая горелка конструкции ТКЗ	Доменный газ	Паровые котлы металлургических заводов	12000...16000
18. Щелевая горелка конструкции ТКЗ	Природный газ	Паровые котлы средней мощности	6900...69000

1	2	3	4
19. Унифицированные горелки типа ГМУ конструкции ЦКТИ-ТКЗ (форсунки механические или паромеханические)	Природный газ, мазут	Паровые котлы большой мощности	30000...90000
20. Горелки однофронтные вихревые (форсунки механические или паромеханические): конструкции ТКЗ, конструкции ХФ ЦКБ НПО «Энергоремонт» конструкции ВТИ-ТКЗ-ХФ ЦКБ НПО «Энергоремонт» конструкции ВТИ-ТКЗ	Природный газ, мазут  То же  То же  То же	Паровые котлы типа: ТГМ-84 ТГМ-104 ТГМ-94 ТГМ-84А ТГМ-94 ТГМ-84А	19700 40100 21000 80300 61200 53500
21. Горелки встречные (форсунки механические или паромеханические): прямоточные конструкции ВТИ-ТКЗ вихревые конструкции ХФ ЦКБ НПО «Энергоремонт» ВТИ-ТКЗ вихревые конструкции ХФ ЦКБ НПО «Энергоремонт» вихревые конструкции ЦКТИ-ТКЗ вихревые конструкции ЦКТИ-ТКЗ-ВТИ вихревые конструкции ЗИО-ВТИ	Природный газ, мазут  То же  То же  То же  То же	Паровые котлы типа:  ТГМП-114  ТГМП-314  ТГМП-324 ТГМП-204 ТГМП-1202 ПК-41	63800  48900  48900 55800 54300 47800
22. Газомазутные подовые горелки конструкции ХФ ЦКБ Главэнергоремонт-ВТИ-ТКЗ-ХПИ (форсунки паромеханические)	Природный газ, мазут	Паровые котлы большой мощности	41000...101000

1	2	3	4
23. Газомазутная горелка фирмы «Пиллард» (форсунка – центробежная со сливом)	Природный газ	Паровые котлы средней и большой мощности	До 55500
24. Газомазутная горелка фирмы «Бабкок-Вилькоккс» (с гамма-форсункой)	Природный газ, мазут	Паровые котлы производительностью 1500...2000 т/ч	55500...77800
25. Газомазутная вихревая горелка с периферийной раздачей газа конструкции НПО ЦКТИ им. И.И.Ползунова	Природный газ, мазут	Паровые котлы большой мощности	6900...62100
26. Горелки ГВС и ДВБ конструкции Стальпроекта	Высококалорийные газы	Нагревательные и термические печи	475...22500
27. Горелки ГТПЦ конструкции Краматорского отлеления ЦНИИТмаша	Природный газ	Термические печи, сушила	170...954
28. Горелки ПИВ конструкции ВНИИ-промгаза	Природный газ; СУГ	Термические и нагревательные печи, сушила, теплогенераторы	70...815
29. Горелки ПИВС конструкции ВНИИ-Ипромгаза	Природный газ	Нагревательные и термические печи, сушила	70; 320
30. Горелки ДИС констуркции Куйбышевского политехнического института (КуПИ)	Природный попутный, нефтяной газ; СУГ	Промышленные печи, сушила	93...930
31. Горелки с переменной длиной факела конструкции КуПИ	Природный газ	Вращающиеся печи	3488...14534
32. Горелки стеклодувные конструкции Москгазниипроекта	Природный газ; СУГ	Для плавления стекла	7,0; 14,6
33. Горелки для пайки изделий	Природный газ; СУГ	Для пайки изделий из цветных и других металлов; для обработки стекла	7

1	2	3	4
<i>Горелки разного назначения</i>			
1. Горелки газовые трубореактивные ГГТР-С конструкции ГИПрониигаса	Природный газ	Котлы, печи, сушила	825...14700 (сняты с производства)
2. Горелка для местного нагрева	Гомогенная газовоздушная смесь	Проходные термические печи	
3. Форкамерные инжекционные горелки конструкции Укрнииинжпроекта (типа ГИФ-Н и ГИФ-С)	Природный газ	Секционные чугунные котлы	148,3...1483 (не прошли Госиспытаний)
4. Стационарные газовые запальные устройства: а) диффузионный запальник б) запально-защитное устройство (ЗЗУ) завода «Ильмарине» в) электрозапальник (ЭЗ) Московского завода тепловой автоматики	Природный газ Природный газ Природный газ	Чугунные секционные котлы  Для розжига газовых или мазутных форсунок, а также для контроля за наличием факела в топке	

## Предметный указатель

Взаимодействие факелов	102.	Коэффициент:	
Воспламенение	33; 44; 78	- длины факела	38; 39.
- нижний, верхний пределы	73.	- избытка воздуха	37; 46; 74; 83; 85; 101.
- - правило Ле Шателье	73; 74.	- молекулярной диф-	
Время индукции	3; 34; 44.	фузии	79.
Газовое хозяйство	62.	- незавершенности	
Газообразное топливо	5; 58.	смешения	68.
- взаимозаменяемость	59; 60.	- равномерности рас-	
- давление	60.	пределения топлива	15; 38.
- доставка	59.	- смесеобразования	37.
- очистка	59.	- состава топлива	38.
Газорегуляторный пункт	61.	- формы тела	23.
Горелка	3; 84; 109.	Мазут	4; 9.
- диффузионная	85; 86.	- доставка	4.
- вихревая	24; 91; 101.	- обработка, присадки	5; 9.
- инжекционная	89; 111.	- перекачивание	10.
- классификация	87.	- подогрев	7; 11.
- компоновка	101; 102; 103.	- распыливание	12; 19; 43.
- конструкции	89...98.	- - оценка	16; 20.
- прямоточная	33; 40; 69; 88.	- - фракционный состав	15; 17; 19.
- технические характери-		- распыливающий агент	13; 19; 47.
ки	84.	- - температура	47; 49.
- типоразмеры	88.	- фильтрация	8.
- типы	24.	Мазутное хозяйство	4.
- требования	84.	Организация топочно-	
Горелочное устройство	59; 64; 65.	го процесса	98.
- компоновка	102.	Одорация	60.
Горение	3.	Плотность орошения	44.
- в факеле	41.	Приведенная пленка	30.
- диффузионное	78.	Распространение пла-	
- закон	70.	мени	33; 74.
- капли	27.	- в потоке	74.
- - тепловой баланс	31.	- нормальная скорость	33; 69; 72.
- кинетическое	78.	- скорость	75.
- организация	41.	- - пульсационная	78.
- скорость	70; 72; 75.	Стабилизаторы	45.
- стабилизация	44.	Степень крутки	25; 40; 82.
- устойчивость	33; 41; 82.	Топливо	3.
- экономичность	46.	- жидкое	3.
Закон косинуса	71.	- газообразное	58.
Зона обратных течений	41.		
Испарение капли	27; 36; 37.		
- константа	29.		

Топливоздушная смесь	3; 12; 32; 64; 69.	- прямоточный	33.
- гомогенная	76; 77.	- срыв	44.
- - ламинарное сжигание	76; 79.	- степень черноты	41.
- - турбулентное сжигание	77; 80.	- тепловое напряжение	100.
- оценка	68.	- угол раскрытия	22; 27; 33; 40.
- смесеобразование	37; 64; 68; 69; 105.	- устойчивость	33; 71; 77; 82.
Топочное устройство	3; 100.	- форма	40; 81.
Турбулентность потока		Форсунка	7; 12; 35; 44; 47; 50.
- естественная и искусствен- ная	81.	- механическая	13; 50; 51.
- крупно- и мелкомасштаб- ная	35; 75.	- паро- и пневмомеха- нические	14; 53.
Факел		- паровые и пневмати- ческие	13; 19; 55.
- взаимодействие	99; 102.	- плоскофакельная	57.
- дальнобойность, длина	36; 39; 79; 81.	- ротационная	58.
- диффузионный	34; 79.	- сопло	14; 42; 69.
- закрученный	33; 40; 68.	- нормализованные	54; 56.
- отрыв	43.	Фронт пламени	33; 42.
- проскок	43; 77.	Химический недожог	38; 60; 80.
		Число Воббе	60; 107.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
1. Сжигание жидкого топлива.....	4
1.1. Подготовка жидкого топлива к сжиганию.....	4
1.2. Горение единичной капли.....	27
1.3. Горение жидкого топлива в факеле.....	33
1.4. Форсунки для сжигания жидкого топлива.....	50
2. Сжигание газообразного топлива.....	58
2.1. Подготовка газообразного топлива к сжиганию.....	58
2.2. Горение газов.....	69
2.3. Горение газообразного топлива в факеле.....	76
2.4. Горелки для сжигания газа.....	83
3. Работа газомазутных топочных устройств.....	98
3.1. Организация топочного процесса.....	98
3.2. Компоновка горелочных устройств.....	101
Библиографический список.....	106
Приложения.....	107
Предметный указатель.....	117

**Евгений Андреевич Блинов**

**Топливо и теория горения**  
**Раздел – подготовка и сжигание топлива**

**Учебно-методический комплекс**  
**(Учебное пособие)**

Редактор И.А.Иванова

Сводный темплан 2007 г.

Лицензия ЛР № 020308 от 14.02.1997г.

Санитарно – эпидемиологическое заключение № 78.01.07.953.П.005641.11.03 от 21.11.2003 г.

---

Подписано в печать

Формат 60x84 1/16

Б.кн.-журн.

П.л.

Б.л

Издательство СЗТУ

Тираж 100

Заказ

---

Северо-Западный государственный заочный технический университет

Издательство СЗТУ, член Издательско-полиграфической ассоциации университетов России

191186, Санкт-Петербург, ул. Миллионная, 5