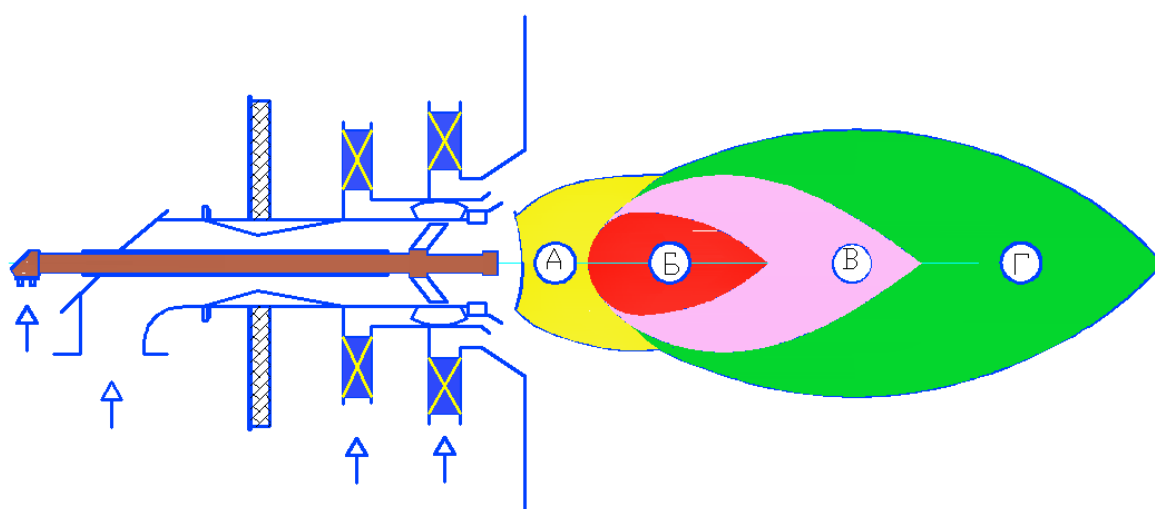


В.Н.Белоусов, О.С.Смирнова, С.Н.Сморозин

## ОСНОВЫ СЖИГАНИЯ ГАЗА



УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

Санкт-Петербург

2009

Посвящается памяти учителя и соратника профессора Тюльпанова Р.С.

## ПРЕДИСЛОВИЕ

В данном учебном пособии рассмотрены механизмы и закономерности процессов горения газообразного топлива, конструкции горелочных устройств и особенности расчёта газовых горелок. Это лишь первая часть задуманного авторами конспекта лекций по курсу «Топливо и теория горения». Первая – не по хронологии изложения материала, а по очередности издания.

Содержание курса сложилось в результате многолетнего опыта преподавания дисциплины на факультете при подготовке студентов по специальности «Промышленная теплоэнергетика».

В работе использовались учебные пособия по данному курсу, подготовленные предшественниками проф. Тюльпановым Р.С. и Алаевым Г.П.

Авторы выражают благодарность Васильевой Е. за оформление иллюстративного материала.

## Вступление

Последние десятилетия отмечены бурным ростом темпов добычи и потребления природного газа. Россия, где среднегодовая добыча в XXI веке составляет от 500 до 700 млрд. м<sup>3</sup>, по этому показателю занимает 1 место в мире (18% всей мировой добычи, примерно 35% мировых запасов).

Топливо-энергетический баланс России, который устанавливает количественную связь между приходными (источники энергии) и расходными (потребители) статьями соответственно выработанной и использованной энергии, представляет собой следующую картину:

<u>Приход</u>		<u>Расход</u>	
Природный газ	42 %	Производство электроэнергии	12 %
Нефть	32 %	Выработка теплоты	16 %
Уголь	17 %	Технология	17 %
Прочие	9 %	Транспорт	16 %
		Сельское хозяйство	4 %
		Экспорт	35 %

Всего через ТЭБ России проходит около 1,7 млрд. тонн условного топлива в год (примерно 12 тонн на душу населения).

На долю природного газа приходится примерно 42 % приходной части ТЭБ России. Основные месторождения сосредоточены в труднодоступных, малонаселённых районах с суровым климатом – Ямало-Ненецкий национальный округ, север Сибири, шельф Северного Ледовитого океана. Крупнейшие месторождения – Уренгойское (10200 млрд. м<sup>3</sup>, открыто в 1966 г.), Ямбургское (5242 млрд. м<sup>3</sup> - 1969 г.), Бованенковское (4385 млрд. м<sup>3</sup> – 1971 г.). Примерно половина газа расходуется внутри страны, вторая половина идёт на экспорт. Мировые цены на газ непрерывно растут.

Столь значимая доля природного газа в топливно-энергетическом балансе страны объясняется его высокими энергетическими качествами, термостабильностью и экологичностью (относительной чистотой продуктов сгорания). Поэтому перспективы применения газового топлива распространяются не только на крупную энергетику и коммунально-бытовой сектор, но и на транспорт (автомобильный, авиационный) и такие отрасли как чёрная и цветная металлургия, химическая промышленность, сельское хозяйство и др.

Замена твёрдого и жидкого топлива на газообразное позволяет повысить эффективность процессов теплообмена, создавать более экономичные и высокопроизводительные теплоиспользующие установки.

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

Цель данного учебного пособия – ознакомить студентов-теплоэнергетиков с основами сжигания газа и расчётом газовых горелок.

## Состав газообразного топлива

Газообразное топливо представляет собой смесь различных горючих и негорючих газов. Основными горючими составляющими большинства газообразных топлив являются предельные углеводороды: метан  $\text{CH}_4$ , содержание которого в большинстве природных газов составляет 90-98% по объёму, этан  $\text{C}_2\text{H}_6$ , пропан  $\text{C}_3\text{H}_8$ , бутан  $\text{C}_4\text{H}_{10}$ , пентан  $\text{C}_5\text{H}_{12}$ , – а также водород  $\text{H}_2$ , оксид углерода  $\text{CO}$  и сероводород  $\text{H}_2\text{S}$  (в редких случаях и в очень малых количествах). Преобладающее содержание метана в природных газах обуславливает близость их физических свойств и теплотехнических характеристик.

Теплота сгорания большинства природных газов находится в сравнительно узком диапазоне  $Q_i^d = 33,5-37,7$  МДж/м<sup>3</sup> (8000-9000 ккал/м<sup>3</sup>). (Для сравнения: теплота сгорания метана  $Q_i^d = 8555$  ккал/м<sup>3</sup>). В негорючий балласт газообразного топлива могут входить азот  $\text{N}_2$ , двуокись углерода  $\text{CO}_2$  и кислород  $\text{O}_2$ . Плотность природных газов близка к плотности основного компонента – метана и изменяется, как правило, в узких пределах  $\rho_r = 0,7-0,8$  кг/м<sup>3</sup>.

## Свойства отдельных компонентов

Метан  $\text{CH}_4$  является наиболее легким из углеводородов, не имеет ни цвета, ни запаха. При полном сгорании метана, согласно реакции  $\text{CH}_4 + \text{O}_2 = \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$  образуются двуокись углерода и водяной пар. Как уже было отмечено, метан является основным компонентом любого природного газа, а также содержится и в большинстве искусственных газов.

*Тяжелые углеводороды* — это собирательное название всех углеводородов с числом атомов углерода в молекуле не менее двух. Химическая формула тяжелых углеводородов в общем виде записывается  $\text{C}_m\text{H}_n$ . Различают

*предельные* углеводороды, у которых молекула полностью насыщена атомами водорода, и *непредельные* углеводороды, у которых число атомов водорода в молекуле меньше, чем у предельных углеводородов при одном и том же количестве атомов углерода.

К *предельным* тяжелым углеводородам относятся углеводороды, характеризующиеся общей формулой  $C_nH_{2n+2}$ , и образующие, таким образом, вместе с метаном единый гомологический ряд (парафиновые углеводороды, или алканы).

Этан  $C_2H_6$  — газ, по плотности близкий к воздуху; при обычных условиях он может рассматриваться как идеальный газ.

Пропан  $C_3H_8$  — это уже тяжелый газ, плотность которого равна плотности двуокиси углерода. При обычных условиях он достаточно близок к началу конденсации: при нормальном давлении пропан переходит в жидкое состояние при температуре минус  $44\text{ }^\circ\text{C}$ , а при температуре  $+20\text{ }^\circ\text{C}$  для этого необходимо давление  $0,85\text{ МПа}$ .

Бутан  $C_4H_{10}$  — газ, имеющий два изомера (разновидности с одинаковой химической формулой и, следовательно, с одинаковым молекулярным весом), отличающиеся расположением атомов в молекуле: н-бутан и изо-бутан.

Этан, пропан и бутан обычно входят в состав тех же газообразных топлив, что и метан, но в значительно меньшем количестве. В связи с этим парциальные давления этих газов, особенно пропана и бутана, очень малы, вследствие чего в составе топлива они могут рассматриваться как идеальные газы.

К *непредельным* тяжелым углеводородам, которые могут входить в состав газообразного топлива, относятся этилен  $C_2H_4$  и его ближайшие гомологи — пропилен  $C_3H_6$  и бутилен  $C_4H_8$  (бутилен имеет три изомера: бутилен-1, бутилен-2 и изо-бутилен). Общая формула углеводородов этиленового гомологического ряда (олефиновых углеводородов, или алкенов)  $C_nH_{2n}$ . По своим физическим свойствам они близки к соответствующим

предельным углеводородам. Они входят в довольно большом количестве в газы, получаемые при переработке нефтепромысловых газов и нефти.

Кроме непредельных углеводородов этиленового ряда, в некоторых газообразных топливах (например, в коксовом газе) содержится бензол  $C_6H_6$  — простейший углеводород ароматического ряда.

При полном сгорании любого из тяжелых углеводородов образуются двуокись углерода и водяной пар.

Балласт газообразного топлива, как уже было отмечено, состоит из диоксида углерода, азота и кислорода.

## **Виды газообразного топлива и природа его образования**

Газообразное топливо можно разделить на две группы: **природные газы**, добываемые из недр земли, и **искусственные газы**, либо специально получаемые при переработке твёрдого или жидкого топлива, либо представляющие собой побочный продукт некоторых технологических процессов.

Согласно общепринятой теории, **природные газы**, так же как и нефть, образовались из остатков растительных и животных организмов, осевших на морском дне, а затем подвергавшихся тысячелетнему воздействию различных физических, биохимических и геологических процессов.

Газы, получаемые из нефтегазовых месторождений при добыче нефти, называют *нефтепромысловыми* или *попутными*.

*Нефтепромысловый* газ поступает на поверхность земли вместе с нефтью. Состав нефтепромысловых газов зависит как от природы нефти, так и от метода его сепарации. Некоторые газы характеризуются повышенным содержанием азота, другие – наличием сероводорода. Теплота сгорания нефтепромысловых газов значительно выше, чем у сухих природных газов и колеблется от 39 до 58 МДж/м<sup>3</sup>.

Среди **искусственных** газов следует, в первую очередь, выделить *нефтезаводские* (нефтяные) газы, образующиеся как побочный продукт целого ряда процессов переработки нефти (температурная перегонка, крекинг, пиролиз, деструктивная гидрогенизация), а также *коксовый* и *генераторный* газ.

*Коксовый газ* является побочным продуктом высокотемпературного коксования каменных углей. Сущность процесса заключается в нагревании предварительно измельчённого угля без доступа воздуха до температуры 950-1100 °С в специальных коксовальних печах. При этом топливо разлагается, и из него выделяются газообразные горючие вещества и смолы. Твёрдый остаток спекается и представляет собой металлургический кокс (практически, чистый атомарный углерод).

*Генераторный газ* представляет собой продукт безостаточной газификации различных твёрдых топлив в специальных установках, называемых газогенераторами.

В последние десятилетия всё большее применение (например, в быту) находят *сжиженные* газы (как правило, смесь пропана и бутана), которые хранятся и транспортируются в жидком состоянии (отсюда и название) в баллонах или резервуарах под давлением порядка 1 МПа. Над уровнем жидкости в баллоне находится смесь насыщенных паров этих компонентов, которая представляет собой высококалорийное жидкое топливо. По мере выхода смеси из баллона жидкая фаза испаряется и, таким образом, может быть использована практически до конца.

### **Механизм горения газа**

Механизм горения газа протекает по-разному в зависимости от теплофизических свойств отдельных компонентов. *Теплоустойчивые* компоненты, к которым относятся, например CO, H<sub>2</sub>, сохраняют свою молекулярную структуру при высокотемпературном нагреве без доступа воздуха. *Теплонеустойчивые* компоненты, например, большинство предельных



углеводородов метанового ряда, при нагревании без доступа воздуха разлагаются с образованием более лёгких соединений и атомов углерода. Температура начала термической диссоциации углеводородов уменьшается с увеличением их молекулярной массы. Например, термическое разложение метана  $\text{CH}_4$  начинается при температуре  $600\div 800^\circ\text{C}$ , этана  $\text{C}_2\text{H}_6$  – при  $485^\circ\text{C}$ , пропана  $\text{C}_3\text{H}_8$  – при  $400^\circ\text{C}$ .

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

При ухудшенном процессе смешения горение твёрдых частиц сажи протекает медленно, затягивается. Факел получается длинным, растянутым. Некоторое количество сажи неизбежно попадает в зоны с недостатком кислорода и не сгорает, что приводит к потерям теплоты с *механическим недожогом*. Кроме того, на поверхностях нагрева образуется жирный налёт сажи, снижающий интенсивность теплообмена.

Классический закон действующих масс и закон Аррениуса устанавливают зависимость скорости химической реакции от концентрации реагирующих веществ и температуры.

Согласно закону действующих масс, в закрытой гомогенной системе при постоянной температуре скорость химической реакции в каждый момент времени пропорциональна произведению концентраций реагирующих веществ:

$$W = k C_A^a C_B^b,$$

где  $k$  – константа скорости реакции, характеризующая число эффективных столкновений молекул, приводящих к реакции;  $a$ ,  $b$  – порядок реакции по отдельным компонентам.

Константа скорости реакции согласно закону Аррениуса является функцией температуры:

$$k = k_0 \exp(-E/RT),$$

где  $k_0$  – вероятностный фактор - коэффициент пропорциональности, характеризующий полное число столкновений всех молекул (активных и неактивных) в единице объема реагирующей смеси;  $E$  – энергия активации;  $R$  – газовая постоянная.

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

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

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

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

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

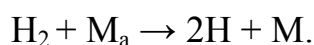
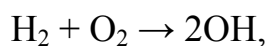
В процессе реакции возникают промежуточные продукты, имеющие более низкие энергии активации, в результате чего цепочка промежуточных реакций протекает с большими скоростями. При этом активными центрами реакции наряду с молекулами исходных веществ с энергией, превышающей энергию активации, могут быть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

### **Механизм цепного горения водорода и метана**

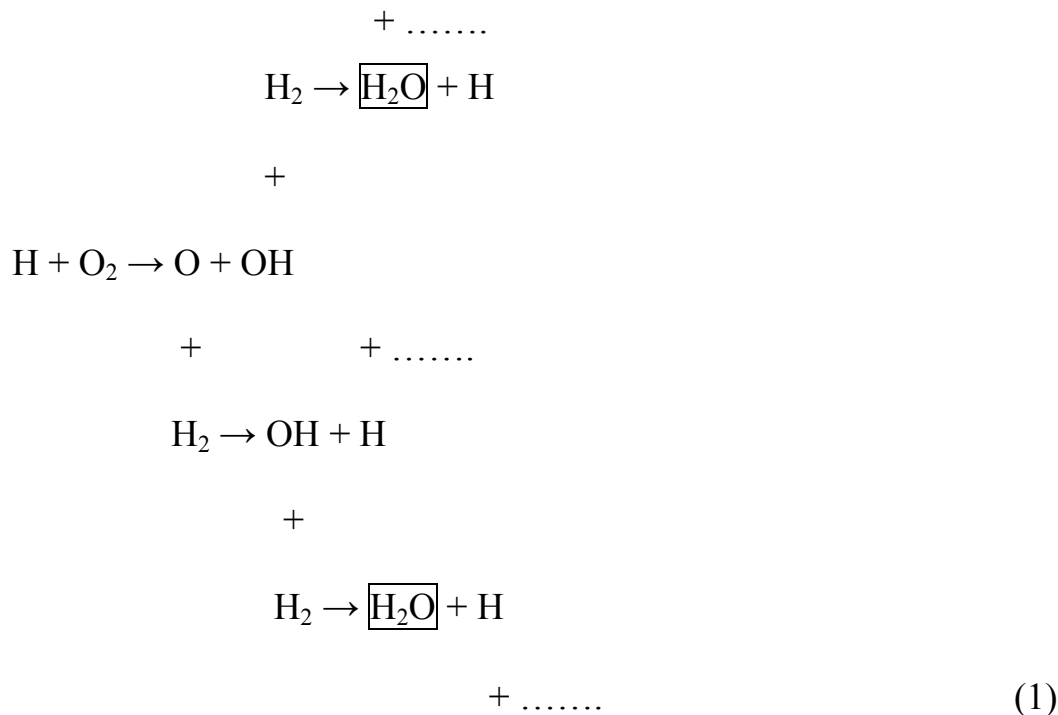
Согласно стехиометрическому уравнению  $2\text{H}_2 + \text{O}_2 = 2\text{H}_2\text{O}$  реакция окисления водорода не может протекать достаточно быстро, т.к. это реакция третьего порядка.

Однако при температуре выше  $500^\circ\text{C}$  горение водорода протекает с большой скоростью по механизму взрывной цепной реакции. При наличии в объёме активных молекул ( $\text{H}_2$ ,  $\text{O}_2$ ), а также посторонних активных молекул ( $\text{M}_a$ ), их соударение приводит к расщеплению молекул и образованию «активных центров».

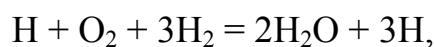
Зарождение цепной реакции с образованием активных радикалов (гидроксильной группы и атомарного водорода) происходит по двум возможным направлениям:



Дальнейший механизм представляет собой последовательную цепь реакций:



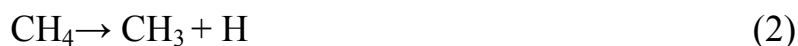
Таким образом, в реакцию вступает один активный атом водорода, а после первого цикла их оказывается уже три:



т.е. реакция развивается лавинообразно. Каждая из промежуточных реакций относится к реакциям первого порядка с энергией активации ниже, чем это следует из стехиометрического уравнения, поэтому и протекают они значительно быстрее.

Рассмотрим *механизм цепного горения метана* (как основного компонента природного газа).

Если нагревание природного газа происходит в воздушной среде, то под действием кислорода метан сравнительно легко распадается с образованием неустойчивого радикала  $\text{CH}_3$  и атомарного водорода:



Освободившийся в результате разложения метана атом водорода  $\text{H}$  реагирует с молекулой кислорода  $\text{O}_2$ , в результате чего образуются гидроксильная группа  $\text{OH}$  и атомарный кислород:



при этом ветвь цепи не завершена, т.е. и гидроксильная группа, и атомарный кислород примут участие в других ветвях цепной реакции, описанных ниже.

Механизм дальнейшего термического разложения радикала  $\text{CH}_3$  может протекать по трём возможным направлениям, каждое из которых приведёт к образованию другого промежуточного неустойчивого компонента – формальдегида  $\text{HCHO}$ :

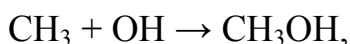
1. Отщепление водорода от радикала  $\text{CH}_3$  с образованием  $\text{CH}$



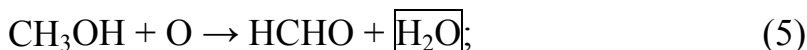
и дальнейшее взаимодействие  $\text{CH}$  с гидроксилем, в результате чего образуется неустойчивый формальдегид:



2. Соединение радикала  $\text{CH}_3$  с гидроксилем, сопровождающееся появлением сравнительно неустойчивого метилового спирта  $\text{CH}_3\text{OH}$ :



при окислении которого также образуется формальдегид:



3. Непосредственное окисление радикала  $\text{CH}_3$ :

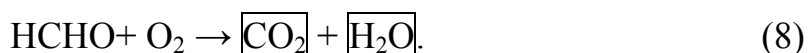


При продолжении цепи возможны два варианта:

1\*. Разложение формальдегида на оксид углерода и водород:



2\*. Окисление формальдегида с образованием конечных продуктов  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ :



## Организация процесса сжигания газа.

## Факторы, оказывающие влияние на процесс горения.

### Диффузионное и кинетическое горение

Процесс горения газа состоит из следующих стадий:

- смешение газа с воздухом,
- нагрев полученной смеси до температуры воспламенения,
- зажигание и реакция горения, сопровождающаяся выделением тепла.

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

Газовые пламена могут быть классифицированы по следующим признакам [18]:

- в зависимости от режима движения - *ламинарный* и *турбулентный* факел;
- по способу образования горючей смеси – *гомогенный* и *диффузионный* факел;
- по геометрии факела – *свободный* и *ограниченный*;
- по аэродинамической схеме движения – *спутный* и *встречный* факел.

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

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

Газовоздушные (газокислородные) смеси являются горючими только в определённом диапазоне соотношения отдельных компонентов.

Любой горючий газ (смесь газов) характеризуется *температурой воспламенения*, существенно зависящей от условий протекания процесса теплоотдачи, а также *нижним и верхним концентрационными пределами* распространения пламени, зависящими от ряда факторов (температуры, давления, содержания примесей и т.п.).

На практике процесс сжигания топлива осуществляется в устройствах (топки, печи, камеры сгорания и др.), отличающихся весьма сложными аэродинамическими характеристиками. При этом ни одно современное топочное устройство не совершенно с аэродинамической точки зрения, т.е. не может обеспечить идеальное (на молекулярном уровне) смешение топлива и окислителя (воздуха). При высоких температурах и концентрациях исходных компонентов (топливо и окислитель), при достаточной активности составляющих горючей смеси химическая реакция протекает согласно закону Аррениуса (кривая 1, рис.1) со столь значительной скоростью (скорость реакции пропорциональна величине  $\text{EXP}(-E/RT)$ ), что процессы смесеобразования (кривая 2, рис.1) отстают по скорости протекания от химической реакции горения и тем самым тормозят процесс сжигания.

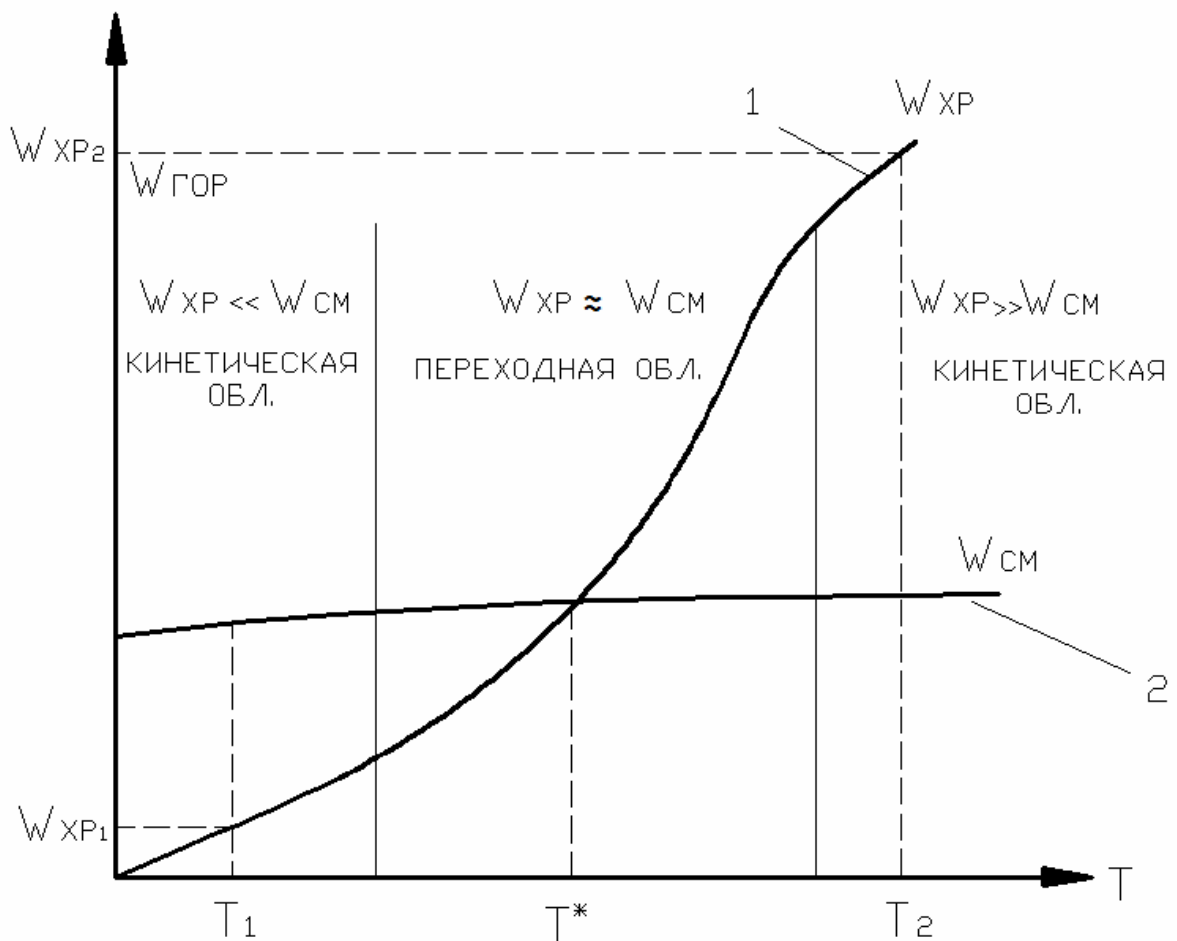


Рис. 1 Кинетическая и диффузионная области горения

В общем случае полное время сгорания  $\tau_{гор}$  складывается из трёх составляющих:

- 1 – время, необходимое для возникновения физического контакта между горючим и окислителем (при сжигании газа – время смесеобразования)  $\tau_{см}$ ,
- 2 – время нагрева горючей смеси до температуры воспламенения  $\tau_{наг}$ ,
- 3 – время протекания самой химической реакции  $\tau_{хим}$

$$\tau_{гор} = \tau_{см} + \tau_{наг} + \tau_{хим}.$$

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

Если время смесеобразования несоизмеримо больше времени, необходимого для прогрева и протекания химической реакции, т.е.



$\tau_{см} \gg \tau_{хим}$  и  $\tau_{см} \gg \tau_{наг}$ , то практически  $\tau_{гор} = \tau_{см}$ . Поскольку процессы смесеобразования определяются законами молекулярной и турбулентной *диффузии*, то подобный процесс называется *диффузионным горением*. Т.е. это означает, что процесс горения протекает в *диффузионной области*.

Примером такого процесса является горение предварительно неподготовленной газо-воздушной смеси, т.е. когда газообразное топливо подаётся в топку не перемешанным с окислителем. В этом случае смешение протекает уже непосредственно в топочном объёме, а время смешения значительно превышает время протекания химической реакции.

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

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

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

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

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

## Горелки для сжигания газа, их назначение и классификация

Сжигание топлива осуществляется с помощью устройств, называемых **горелками**. Они предназначены для подачи в топочную камеру (или в камеру сгорания) необходимых для достижения заданной производительности агрегата количеств топлива и окислителя, создания благоприятных условий их перемешивания (смешения) до начала горения или в самом процессе горения, воспламенения горючей смеси и стабилизации факела. Это достигается различными конструктивными приёмами.

Большинство газовых горелок независимо от их типа имеет общие конструктивные элементы: устройства для подвода газа и воздуха (топлива и окислителя), смесительную камеру, горелочный насадок и стабилизирующее устройство [11].

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

В зависимости от способа подачи в топочную камеру газа и окислителя (воздуха) и условий образования горючей смеси различают три основных **принципа организации процесса горения** и соответствующие им **виды горелок**:

1. Принцип *внешнего смешения*, когда газ и воздух подаются в зону горения отдельно (в виде отдельных струй или потоков), а смешение их происходит непосредственно за срезом горелки в пределах самого пламени за счёт эжектирующего действия струи или турбулентно-молекулярной диффузии - *диффузионное горение* - **диффузионная горелка** -  $\alpha_{гор}=0$  (рис.2.1);

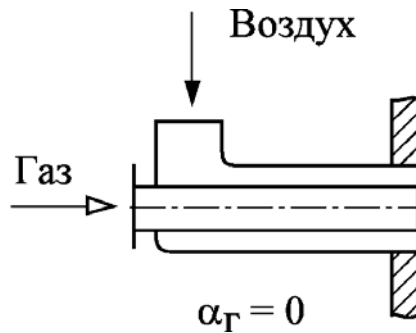


Рис. 2.1. Диффузионная горелка

2. Принцип *полного внутреннего смешения*, когда газ со всем эжектируемым или принудительно подаваемым воздухом, необходимым для горения, смешивается непосредственно в пределах горелки, при этом в зону горения поступает *однородная* газозвоздушная смесь - *кинетическое горение* - **горелка с полным предварительным смешением** -  $\alpha_{гор} > 1$  (рис. 2.2);

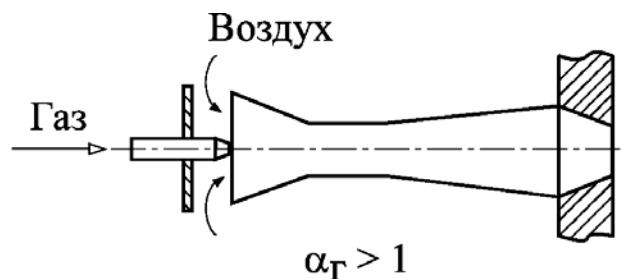


Рис. 2.2. Горелка с полным предварительным смешением

3. Принцип *частичного внутреннего смешения*, когда газ смешивается в пределах горелки лишь с частью воздуха, необходимого для горения (*первичный воздух*), а остальная часть воздуха (*вторичный воздух*) подаётся в топку отдельным потоком, и окончательное смешение происходит уже в топочном объёме совместно с процессом горения - **горелка с частичным предварительным смешением** -  $\alpha_{гор} < 1$  (рис.2.3).

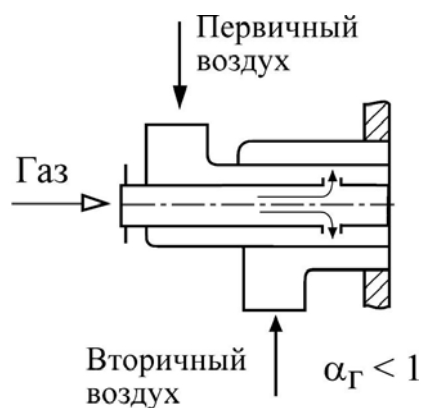


Рис. 2.3. Горелка с частичным предварительным смешением

В зависимости от выбранного способа образования горючей смеси и соответствующей конструкции горелки процесс сжигания газа может сопровождаться образованием *короткого* или *длинного* и *светящегося* или *несветящегося* факела.

При раздельной подаче топлива и воздуха (диффузионная горелка) или при условии их неполного или частичного предварительного смешения сгорание газа происходит в *растянутом факеле* по мере смешения газа с воздухом. Факел при этом, как правило, получается *светящимся* (особенно при сжигании газа с большим содержанием углеводородов и местном недостатке воздуха), что важно с позиции интенсивности лучистого теплообмена в топке. Горелки, образующие видимый факел, называются *факельными*.

При сжигании предварительно подготовленной газозвушной смеси факел получается *коротким* и *несветящимся*. При этом значительно повышается полнота сгорания и уменьшается необходимый коэффициент избытка воздуха. Такие горелки условно называют *беспламенными*.

Наряду с основополагающим принципом классификации горелок (*принцип образования горючей смеси*) существуют и другие подходы или классификационные признаки:

- вид сжигаемого топлива
- способ подачи воздуха
- характер истечения потоков

- форма устья горелки (геометрия)
- способ завихрения (крутки)
- способ регулирования крутки потоков
- давление газа
- скорость истечения
- степень автоматизации
- и прочие.

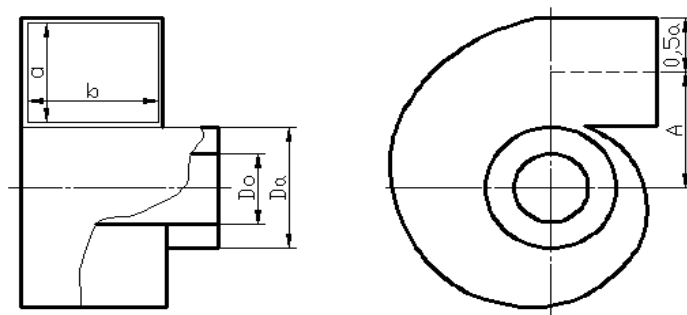
По способу подачи воздуха горелки делятся на две группы:

- с принудительной подачей воздуха от вентилятора (*дутьевые горелки*)
- с подачей воздуха путём эжектирования его газовой струёй или за счёт разряжения в топке.

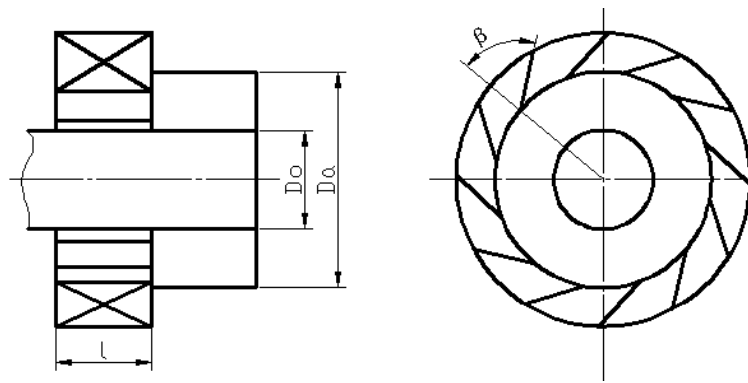
Дутьевые горелки в свою очередь в зависимости от характера истекающих потоков подразделяются на **прямоточные** и **вихревые**.

В **прямоточных горелках** структура факела зависит от формы устья горелки, которая может быть *прямоугольной, щелевой и круглой*.

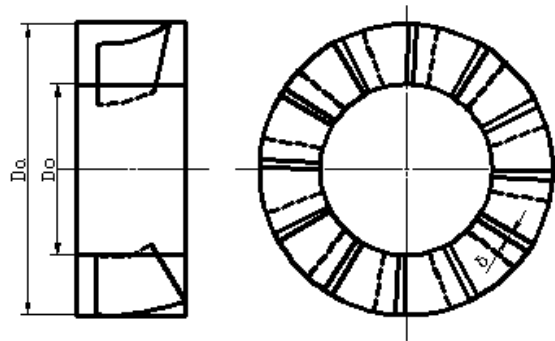
В **вихревых горелках** основополагающим является *тип завихрителя* (рис.3) (принцип организации крутки потоков), среди которых наибольшее распространение получили улиточный аппарат – У (рис.3 а) и лопаточные завихрители: тангенциальный – Т (рис.3 б) и аксиальный (осевой) – А (рис.3 в).



а) улиточный



б) тангенциальный лопаточный



в) – аксиальный лопаточный

Рис. 3. Принципиальные схемы завихрителей

Основные аэродинамические характеристики закрученных струй: профили скоростей (осевой, тангенциальной, радиальной), изменение максимальных скоростей вдоль оси струи, максимальная скорость обратного тока, количество газов рециркуляции и размеры зоны рециркуляции, распределение давления и другие параметры, – определяются, прежде всего, безразмерным интегральным параметром крутки  $n$ , который сохраняется постоянным вдоль струи

Параметр крутки, геометрия горелки, соотношение скоростей и расходов первичного и вторичного воздуха – все эти характеристики оказывают существенное влияние на форму факела и угол его раскрытия, размеры зон рециркуляции дымовых газов, интенсивность тепло- и массопереноса и т.п.

*Интенсификация процесса смешения* горючего с окислителем может быть достигнута следующими способами:

- увеличение скорости потоков
- подача потоков под углом друг к другу
- дробление смешивающихся потоков на отдельные струи
- использование стабилизаторов в виде стенки, плохо обтекаемого тела или суживающегося сечения
- применение так называемого “острого дутья”, т.е. ввод с большой скоростью дополнительных струй воздуха, турбулизирующих основной поток
- закручивание потоков воздуха.

### **Устойчивость (стабилизация) фронта воспламенения**

Важнейшим функциональным элементом, который может в значительной степени воздействовать на процессы, протекающие в топочном пространстве котлоагрегата, является горелка.

Воздействовать на процесс горения можно, в первую очередь, соответствующей организацией аэродинамики на начальном участке формирования факела. Речь идёт об аэродинамике потока топочных газов и процессах турбулентного переноса тепла и массы, которые зависят от конструкции горелки и взаимного расположения горелок в топочной камере.

Каждая горелка в заданных пределах изменения производительности должна обеспечить устойчивое *зажигание* и *стабилизацию фронта воспламенения* [1]. Под стабилизацией факела подразумевается создание условий, обеспечивающих надёжное горение факела без погасаний, пульсаций или отрыва от горелки.

Факел считается устойчивым, если при установившемся режиме подачи топлива он стабилизируется вблизи устья горелки и не меняет своего среднего положения в пространстве. Это состояние факела является результатом взаимодействия скорости распространения пламени и противодействующей ей скорости потока газовой смеси, вытекающей из устья горелки. Если

скорость потока газозвушной смеси превышает скорость распространения пламени, явление втягивания пламени в горелку, или так называемого *проскока* пламени, невозможно. При этом, если скорость истечения газозвушной смеси чрезмерно высока, смесь не успевает в достаточной степени прогреться за счёт рециркуляции продуктов сгорания к корню факела, и происходит *отрыв факела* (погасание пламени).

На рис.4 показаны качественные границы устойчивости пламени в зависимости от степени аэрации горючей смеси, т.е. коэффициента избытка воздуха в горелке (доли первичного воздуха) и скорости истечения газозвушной смеси.

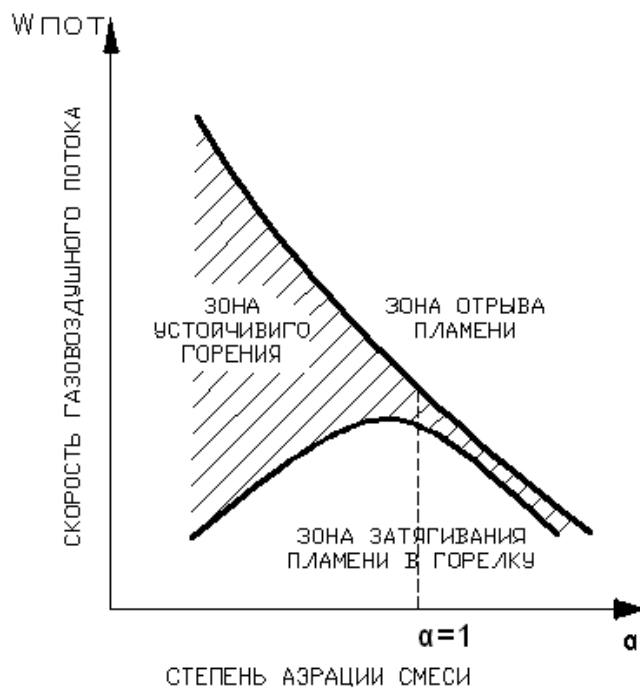


Рис. 4. Границы устойчивости пламени в зависимости от коэффициента избытка воздуха и скорости газозвушного потока на выходе из горелки

*Нижний предел устойчивости горения* изменяется по кривой, напоминающей закон изменения скорости горения в зависимости от концентрации газозвушной смеси [6]. *Верхний предел устойчивого горения* с увеличением  $\alpha_{гор}$  резко снижается. Как видно, устойчивое горение в широком



диапазоне скоростей наблюдается лишь при малом количестве первичного воздуха в исходной горючей смеси. В этом случае устойчивость горения обеспечивается хорошим источником воспламенения – диффузионным факелом, возникающим в камере при горении газа за счёт вторичного воздуха. С увеличением  $\alpha_{гор}$  (доли первичного воздуха) пределы устойчивого горения сокращаются, т.к. влияние диффузионного фронта воспламенения нивелируется. При  $\alpha_{гор} = 1$ , т.е. когда диффузионное горение вообще отсутствует, горение смеси устойчиво лишь в очень узком диапазоне изменения скорости истечения газозвдушного потока.

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

## Прямоточные и вихревые горелки

В *прямоточных* (с незакрученным потоком) горелках любой формы (щелевидных, прямоугольных, круглых и др.) *воспламенение факела* происходит с периферии благодаря вихреобразованию вокруг устья горелки, вызванному эжектирующей способностью вытекающей из неё газозвдушной смеси (*газы внешней рециркуляции*). При этом достаточно перемешать лишь периферийный слой газа с воздухом, т.к. воспламенение газа происходит в широких пределах изменения коэффициента избытка воздуха (от 0,62 до 1,93). Обеспечение на периферии факела концентрации горючей смеси с содержанием воздуха в этих пределах не представляет особых затруднений. Поэтому воспламенение горючей смеси в топочной технике обычно не лимитирует процесс сжигания газа.

Для обеспечения эффективности процесса горения топлива в топке котла, т.е. для увеличения степени выгорания топлива, необходимо интенсивное

смешение топлива с воздухом, что в первую очередь определяется аэродинамикой, как самой топки, так и горелки.

Завихрение потока может быть обеспечено благодаря соответствующему расположению горелок в топочной камере. На процесс смешения может оказывать воздействие и сама горелка благодаря интенсификации процессов турбулентного обмена. Например, у *плоскофакельных* горелок потоки топлива и воздуха можно разделить на многочисленные отдельные струи малой толщины, в результате чего образуется регистр горелок.

Из многочисленных исследований известно, что простейшие средства (например, увеличение скорости истечения) оказывают лишь очень незначительное влияние на длину диффузионного пламени в неограниченном пространстве. Улучшения процесса смешения можно достичь, если потоки топлива и воздуха подаются в топку не параллельно, а наклонно друг к другу.

Для воспламенения топливно-воздушной смеси необходимо обеспечить подвод тепла с горячими дымовыми газами из топочного объёма в *окологорелочную* область. При использовании *параллельноструйных* горелок подвод тепла возможен только благодаря внешней рециркуляции, поэтому при компоновке необходимо предусмотреть достаточное пространство между отдельными горелками. Если же конструкция горелок или их компоновка делает это невозможным (например, при реконструкции), необходим другой концептуальный подход, который обеспечит подвод необходимого для воспламенения топлива количества тепла в окологорелочную область.

Один из возможных способов достижения этой цели заключается в закручивании потоков воздуха и топливно-воздушной смеси. В результате увеличиваются градиенты скорости между истекающими потоками и окружающей средой, благодаря чему интенсифицируются процессы смешения и массообмена, а также изменяется длина факела. Опыт показывает, что при применении вихревых горелок изменение параметров крутки оказывает значительное влияние на процесс раскрытия и распространения струи.

Основное различие между параллельноструйными и вихревыми горелками заключается в способе организации потока рециркуляции и, как следствие, в природе возникновения и распространения пламени.

По сравнению с прямоточными вихревые горелки обладают значительно большими возможностями по воздействию на процесс воспламенения, горения и геометрии пламени.

В *вихревых горелках* возможны различные варианты распространения струи (рис.5).

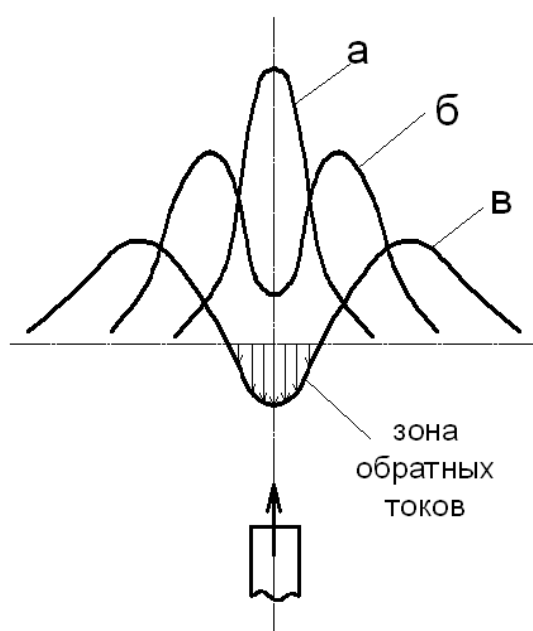


Рис. 5. Профиль скорости на выходе из вихревой горелки

При незначительной крутке на оси свободно распространяющейся струи уменьшается статическое давление. Струя распространяется под действием центробежных сил, вызванных вращающимся движением частиц потока. До тех пор, пока между силами сжатия или центробежными силами сохраняется равновесие, профиль осевой составляющей скорости подобен случаю распространения свободной незакрученной струи и сохраняет форму кривой нормального распределения Гаусса (рис.5 – кривая а).

При усилении крутки потока силы сжатия компенсируют часть импульса осевого потока и тем самым замедляют его. Поскольку максимальное падение

давления происходит на оси струи, наибольшее торможение осевого потока имеет место также на оси. При дальнейшем повышении степени крутки образуется профиль скорости с впадиной посередине (рис.5 – кривая б).

Последующее увеличение крутки приведёт к тому, что силы сжатия превысят осевой импульс потока вблизи оси и вынудят повернуть осевой поток в обратном направлении (рис.5 – кривая в). Образующийся в *окологорелочной* области *обратный вихрь* играет важнейшую роль в первую очередь при стабилизации вихревого пламени. Размер зоны внутренней рециркуляции (зоны обратных токов) и её удаление от среза горелки определяется геометрией горелки, степенью крутки и соотношением режимных параметров.

Периферийная и внутренняя поверхность факела играет роль постоянных зажигательных поясов для всего фронта пламени. Обеспечение постоянного источника зажигания факела с периферии и с центра особенно целесообразно при сжигании низкокалорийных газов, например газов подземной газификации твёрдого топлива или отходов сажевых заводов.

При истечении струи из параллельноструйной горелки поток рециркуляции образуется только снаружи, так что пламя зарождается на границе истекающей струи топливно-воздушной смеси и распространяется внутрь, при этом процесс смешения с потоком вторичного воздуха протекает в том же направлении. Напротив, вихревая горелка со сверхкритическим параметром крутки образует пламя в середине топливно-воздушной струи. Таким образом, распространение пламени происходит в направлении от оси, тогда как процесс смешения с вторичным воздухом протекает в противоположном направлении, т.е. снаружи внутрь (рис.6).

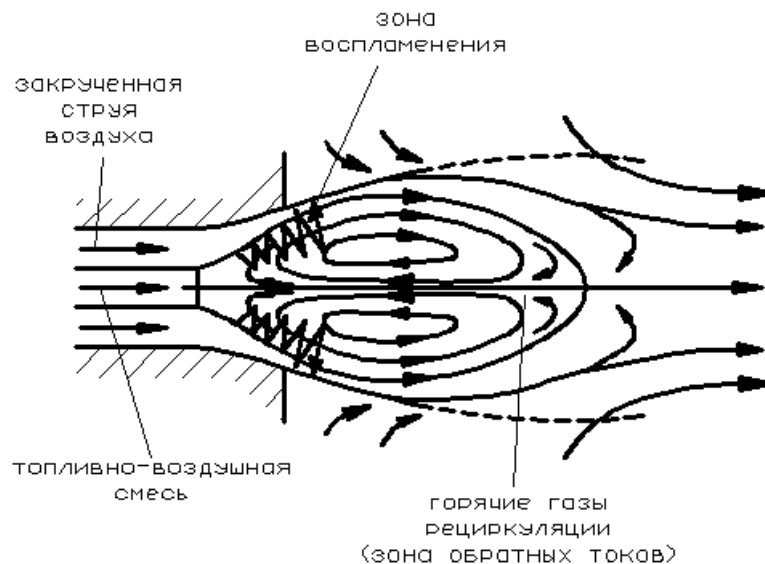


Рис. 6. Зона обратных токов на выходе из вихревой горелки

Конструкции двух типов горелок существенно отличаются друг от друга. В параллельноструйной горелке устья каналов вторичного воздуха и топливно-воздушной смеси отделены друг от друга и, как правило, расположены друг над другом, тогда как в вихревой горелке каналы вторичного воздуха и смеси топлива с первичным воздухом расположены концентрично, т.е. осесимметрично. Объясняется это тем, что внутренняя рециркуляция вызывается, как правило, круткой потока вторичного воздуха.

Преимущества, достигаемые круткой потока, лишь в том случае осуществимы, когда существует возможность регулировать степень крутки. Регулировка степени крутки может осуществляться, например, благодаря тому, что часть суммарного потока (смесь топлива с первичным воздухом) подаётся через горелку прямоточно, т.е. без крутки, тогда как оставшаяся часть воздуха, необходимого для горения (вторичный воздух), подаётся тангенциально, или закручивается с помощью специального лопаточного регистра. Таким образом, изменяя соотношения первичного и вторичного воздуха, можно регулировать суммарную степень крутки. Если же предусмотреть возможность изменения угла установки завихряющих лопаток, то тем самым можно также

воздействовать на процессы смешения и обеспечить ступенчатую регулировку длины факела.

Вихревые пламена со сверхкритическим параметром крутки характеризуются возникновением зоны внутренней рециркуляции в корне факела (рис.5,6). В отличие от зоны внешней рециркуляции, возникающей между внешней границей факела и стенкой камеры сгорания вследствие турбулентного эжектирования продуктов сгорания к границе струи, область внутренней рециркуляции заключена непосредственно внутри факела [15].

Благоприятное воздействие такой внутренней зоны обратных токов на воспламенение топлива заключается в том, что вихревая кольцевая область не является изолированной от внешнего потока, а, наоборот, характеризуется интенсивным турбулентным тепло- и массообменом с обтекающим её внешним потоком [16]. В результате возникновения зоны внутренней рециркуляции организуется подвод горячих дымовых газов из зоны интенсивного горения, расположенной на некотором расстоянии от горелки, к свежему воздуху в корне факела (рис.6). Таким образом, в кольцевой зоне смешения между зоной внутренней рециркуляции и внешним потоком свежего вторичного воздуха возникают благоприятные для воспламенения условия:

- повышенная температура;
- высокая интенсивность турбулентности;
- низкая средняя осевая скорость потока.

Коренное отличие внутренней рециркуляции от внешней, с точки зрения благоприятного воздействия на процесс воспламенения, заключается, в первую очередь, в том, что зона внутренней рециркуляции характеризуется отсутствием конвективного теплового потока, направленного к стенкам камеры сгорания, а поток лучистого теплообмена незначителен из-за сравнительно короткого времени пребывания газов в зоне обратных токов. В результате существенно сокращаются потери тепла из зоны воспламенения. При правильной конструкции дымовые газы из зоны наивысшей температуры обратным током подсасываются к начальному участку факела и регулируют

процесс воспламенения. Таким образом, вихревая горелка характеризуется способностью к автономному воспламенению.

Вихревая горелка со ступенчатым подводом воздуха обеспечивает, наряду со стабильным воспламенением, снижение концентрации  $NO_x$ .

Отличительной чертой такой горелки, спроектированной на кафедре промышленной теплоэнергетики СПбГТУРП, является ступенчатый подвод вторичного воздуха по двум осесимметричным каналам, что позволяет регулировать процессы смесеобразования и горения (рис.7). В зоне формирования факела обеспечиваются условия нестехиометрического горения с недостатком кислорода, что влечёт за собой торможение реакции образования оксидов азота. Остальная часть необходимого для горения воздуха подаётся по внешнему кольцевому каналу, окружает «богатую» смесь, обеспечивая полное догорание топлива. Увеличение суммарной площади «живого» сечения воздушных каналов (расширение амбразуры горелки) приводит к снижению интенсивности турбулентности и позволяет регулировать процесс сжигания путём перераспределения воздуха по трём каналам [14].

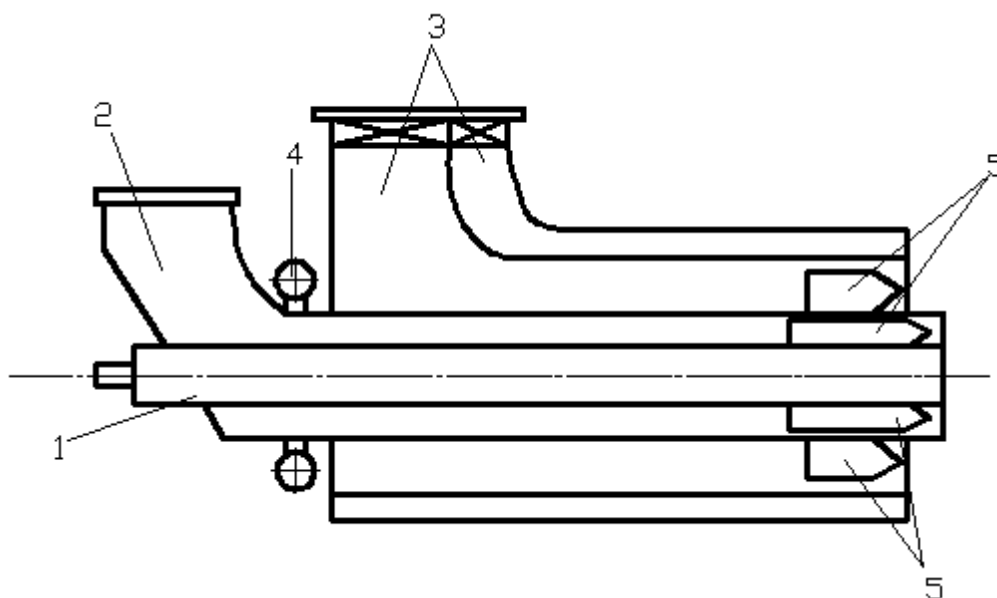


Рис. 7. Горелка, обеспечивающая снижение концентрации  $NO_x$

1 – мазутная форсунка, 2 – первичный воздух, 3 – вторичный и третичный воздух, 4 – газовый коллектор, 5 – осевой закручивающий аппарат

## Расположение горелок на стенках топочной камеры

Интенсивность процессов горения и теплообмена, а, следовательно, и условия надёжной эксплуатации топочной камеры определяются не только конструкцией горелок и режимными параметрами, но и схемой размещения горелок на стенках топки. Наибольшее распространение для обычных однокамерных топок получило **фронтальное** (рис.8а), **встречное** (рис.8б) и **угловое** (рис.8в) расположение горелок).

При **фронтальном** расположении горелок струи, истекающие из отдельных горелок, первоначально развиваются самостоятельно, а затем сливаются в единый поток. По мере распространения струя подсасывает (эжектирует) топочные газы, масса её значительно увеличивается, а концентрация окислителя снижается. Во избежание касания струёй противоположной (задней) стенки топочной камеры при фронтальном расположении целесообразно использование вихревых горелок, которые дают относительно короткий факел.

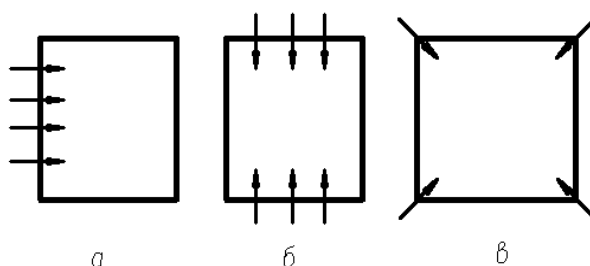


Рис. 8. Схема расположения горелок в топочной камере

При **встречном** расположении горелки могут устанавливаться либо на противоположных боковых стенках, либо на фронтальной и задней, причём возможна как *встречно-лобовая*, так и *встречно-смещённая* компоновка.

При *встречно-лобовой* компоновке в топке получается концентрированный удар встречных потоков, в результате чего поток разделяется на два направления: одна часть потока поднимается в верхнюю половину топки, а другая опускается вниз. При неравенстве импульсов



встречных потоков возникает асимметричность течения, и результирующий факел может приблизиться к одной из стен.

При встречно-смещённой компоновке горелок потоки взаимно проникают друг в друга, при этом происходит лучшее заполнение факелом топочного объёма, выравнивается поле температур, обеспечивается интенсивный подвод теплоты к корню факела, стабилизируется воспламенение.

### Особенности расчёта газовых горелок

Точный расчёт газовых горелок представляет собой задачу неоправданной сложности, поэтому практикой разработаны различные методы приближённого расчёта, которые дают вполне приемлемые результаты. Большое распространение в энергетических установках получили газовые горелки, в которых воздушный поток поперечно пересекается мелкими струями газа, при этом газ может подаваться по центральной трубе (горелка типа “труба в трубе”) или с периферии (рис.9).

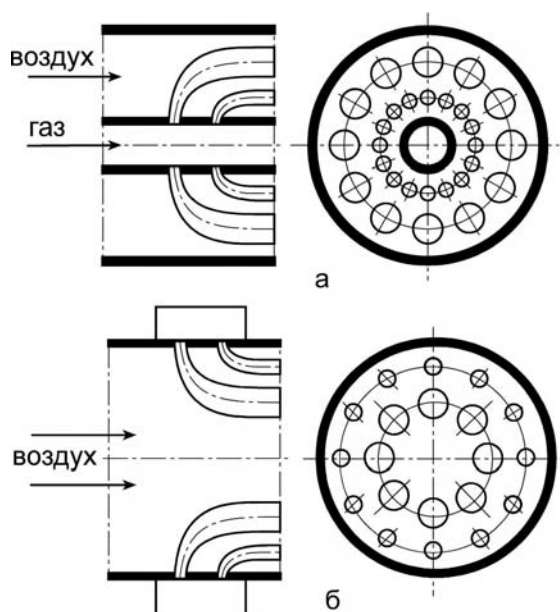


Рис. 9. Схемы подачи газа в поперечный поток воздуха

а - по центру, б - с периферии

На рис.10 представлен примерный характер геометрии струй газа, истекающих в поперечный поток воздуха.

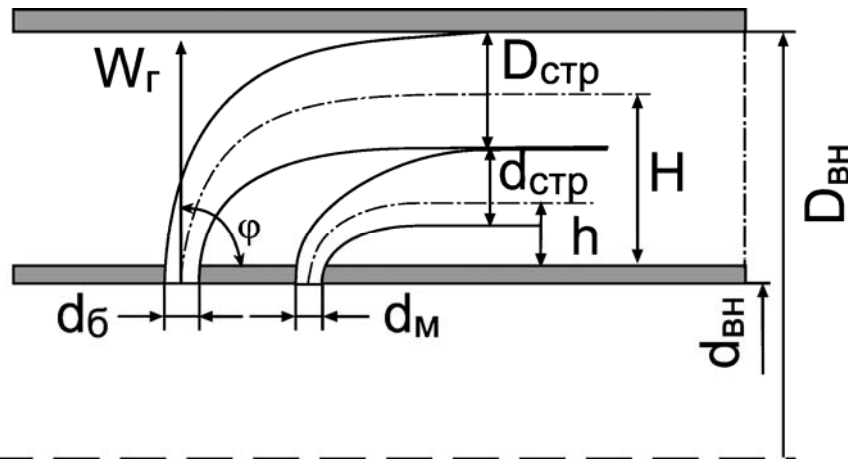


Рис. 10. Распространения газовых струй в поперечном потоке воздуха

Под действием воздушного потока траектория струи искривляется и сама струя становится шире за счёт диффузионного размытия. Струи газа по мере проникновения в поток воздуха будут сноситься этим потоком.

При достижении определённого расстояния  $h$  от стенки газового коллектора осевая линия струи газа будет совпадать направлением сносящего потока воздуха. Это расстояние называется глубиной проникновения струи в сносящий поток и зависит от диаметра сопла  $d_c$  вытекающей струи и отношения скоростей ( $W_s, W_в$ ) и плотностей ( $\rho_s, \rho_в$ ) газа и воздуха.

Для более равномерного распределения газовых струй по сечению горелки и для лучшего смешения газа с воздухом газовые сопла выполняются, как правило, в два ряда, причём первый (по ходу воздуха) ряд сопел имеет бóльший диаметр, чем второй.

Эффективное смешение газовых струй с окислителем имеет место при определенном числе этих струй. При малом числе струй их диаметр будет большим, при этом потребуются длинный смеситель для завершения смесеобразования (расстояние от газовыпускных отверстий до выходного сечения горелки принимается равным 30–40 диаметрам газовых отверстий). При большом числе струй они могут сливаться друг с другом в потоке

окислителя в сплошную кольцевую струю и условия смесеобразования ухудшаются.

Базовой формулой при расчёте таких горелок является полученная на основании многочисленных экспериментов Ю.В.Ивановым [1] зависимость для определения относительной глубины проникновения газовых струй в поперечный поток воздуха:

$$\frac{h}{d_c} = \frac{k_s \sin \varphi}{\eta \sqrt{\mu}} \frac{W_\Gamma}{W_B} \sqrt{\frac{\rho_\Gamma}{\rho_B}}, \quad (9)$$

где  $h$  – абсолютная глубина проникновения струи газа в воздушный поток;

$d_c$  – диаметр газового сопла;

$k_s$  – поправочный коэффициент, зависящий от относительного шага между соплами, расположенными в одном ряду

(при  $s/d_c=4$   $k_s=1,6$ ;  $s/d_c=8$   $k_s=1,7$ ;  $s/d_c=16$   $k_s=1,9$ ;  $s/d_c \rightarrow \infty$   $k_s=2,2$ );

$\varphi$  – угол ввода газовой струи;

$W_\Gamma$  и  $W_B$  – соответственно скорость истечения газа из сопел и средняя скорость воздушного потока;

$\rho_\Gamma$  и  $\rho_B$  – плотности газа и воздуха при расчетных температурах;

$\mu$  – коэффициент расхода (для отверстий в тонкой стенке  $\mu=0,62$ );

$\eta$  – коэффициент, учитывающий увеличение скорости сносящего потока из-за ввода в него газа;

$$\eta = (G_\Gamma \rho_\Gamma + G_B \rho_B) / G_B \rho_B,$$

здесь  $G_\Gamma$  и  $G_B$  – соответственно объемные расходы газа и окислителя.

Отверстия (сопла) для выхода газа должны быть расположены таким образом, чтобы струи в том сечении, где они принимают направление потока, перекрывали всё сечение.

При расчёте глубины проникновения струй газа, истекающих из больших и малых сопел, исходят из следующих предположений (рис.10):

в том сечении, где большие и малые струи принимают направление потока воздуха

- они соприкасаются друг с другом,

- внешняя граница больших струй достигает внешней границы кольцевого канала.

При расчёте газовых горелок для определения глубины проникновения струи по формуле (9) приходится предварительно задаваться значениями скоростей газа и воздуха, а также исходить из полученных опытным путём рекомендаций.

Для правильного выбора наиболее подходящей горелки и определения необходимых размеров топочной камеры необходимо знать длину и форму факела, создаваемого горелкой, при этом под длиной факела понимают осевое расстояние от среза горелки, на котором заканчивается процесс горения и химический недожог становится равным нулю.

Как уже отмечалось, в топках энергетических установок сравнительно редко применяют свободные диффузионные факелы. Чаще всего используют закрученные струи, позволяющие значительно улучшить смесеобразование и тем самым увеличить интенсивность горения и уменьшить длину факела. Теоретический расчет длины и формы факела в этом случае значительно затруднен.

Далее на примере будет рассмотрен практический подход к расчёту газовых горелок.

### **Коаксиальная горелка типа “труба в трубе”**

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

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

$$W_2 = 40 \div 120 \text{ м/с}, W_6 = 25 \div 80 \text{ м/с}.$$

Принципиальная схема горелки представлена на рис.11.

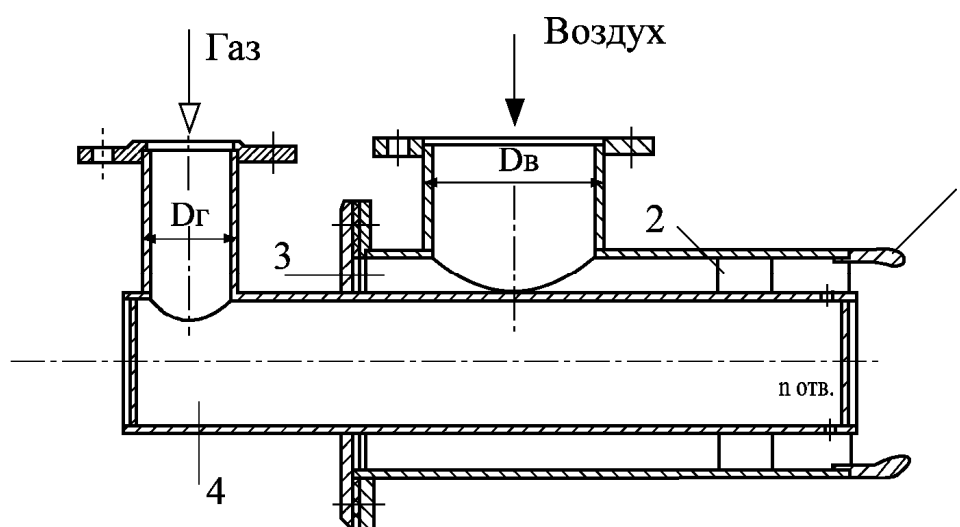


Рис. 11. Коаксиальная горелка типа “труба в трубе”

1- огневой насадок с пережимом, 2 - лопатки, 3 - воздушная камера, 4 - газовая камера.

Исходные данные для расчёта:

$\alpha_2$  - коэффициент избытка воздуха в горелке;

$W_в$  - скорость воздуха, м/с;

$W_г$  - скорость газа на выходе из сопел, м/с

$t_в$  - температура воздуха, °С;

$G_г^0$  - объёмный расход газа, м<sup>3</sup>/с;

$t_г$  - температура газа, °С;

Состав газа:  $CH_4, C_2H_6, C_3H_8, C_4H_{10}, C_5H_{12}, CO, H_2, H_2S, CO_2, O_2, N_2, \%$ .

**Порядок расчёта**

Теоретически необходимое количество воздуха для сжигания газа:

$$V_B^0 = 0,0476 \left[ 0,5CO + 0,5H_2 + 1,5H_2S + \sum \left( m + \frac{n}{4} \right) C_m H_n - O_2 \right]; \text{ м}^3 / \text{м}^3 \quad (10)$$

Действительный расход воздуха:

$$G_B = G_\Gamma^0 V_B^0 \alpha \frac{t_B + 273}{273}; \text{м}^3 / \text{с} \quad (11)$$

Действительный расход газа:

$$G_\Gamma = G_\Gamma^0 \frac{t_\Gamma + 273}{273}; \text{м}^3 / \text{с} \quad (12)$$

*Примечание 1:* Если задан не расход газа, а производительность или мощность теплотехнической установки (например, котла), то расход газа

$$G_\Gamma^0 = \frac{Q_{ка} 100}{Q_i^d \eta_{ка}}; \text{м}^3 / \text{с},$$

где  $Q_{ка}$  – теплопроизводительность котла, Вт;

$\eta_{ка}$  – КПД котла, %;

$Q_i^d$  – низшая теплота сгорания сухого газа, Дж/м<sup>3</sup>.

*Примечание 2:* При необходимости предварительно выбирается число горелок на котёл (или другую теплотехническую установку)  $n_{гор}$  и рассчитываются действительные расходы газа и воздуха на одну горелку.

Из уравнения расхода газа определяется внутренний диаметр газоподводящей трубы  $d_{вн}$ :

$$G_\Gamma = \frac{\pi d_{вн}^2}{4} W_{г.тр} \cdot \quad (13)$$

Скоростью газа в трубе следует предварительно задаться. Рекомендуемые значения скорости  $W_{г.тр} = W_г - (5 \div 10) \text{ м/с}$ .

Из уравнения расхода воздуха

$$G_B = \frac{\pi}{4} (D_{вн}^2 - d_n^2) \cdot W_B \quad (14)$$

определяется внутренний диаметр наружной воздухоподводящей трубы  $D_{вн}$ , (здесь  $d_n$  – наружный диаметр газоподводящей трубы).

Как уже было отмечено, при расчёте глубины проникновения струй газа, истекающих из больших и малых сопел, исходят из предположения, что в том сечении, где большие и малые струи принимают направление потока воздуха, они соприкасаются друг с другом, а внешняя граница больших струй достигает внешней границы кольцевого канала. При этом согласно опытным данным [1] диаметры больших и малых струй:

$$D_{cmp} = 0,75H \quad \text{и} \quad d_{cmp} = 0,75h .$$

Из схемы распространения струй в кольцевом канале (рис.10) следует, что глубина проникновения больших струй:

$$H + \frac{D_{cmp}}{2} = \frac{D_{вн} - d_n}{2} \rightarrow H + 0,375H = \frac{D_{вн} - d_n}{2} \rightarrow H = \frac{D_{вн} - d_n}{2,75} , \quad (15)$$

а малых:

$$h + \frac{d_{cmp}}{2} = H - \frac{D_{cmp}}{2} \rightarrow h + 0,375h = H - 0,375H \rightarrow h = \frac{0,625}{1,375} H . \quad (16)$$

По формуле (9) определяются диаметры больших и малых сопел, при этом принимается  $k_s = 1,6$ .

Принимая, согласно экспериментальным данным, что 80% объёма газа подаётся через большие сопла, а 20% – через малые, определяются геометрические характеристики горелки:

суммарная площадь больших и малых сопел:

$$\sum f_{\sigma} = 0,8 \frac{G_{\Gamma}}{W_{\Gamma}} , \quad \sum f_{\mu} = 0,2 \frac{G_{\epsilon}}{W_{\epsilon}} , \quad (17)$$

количество больших и малых сопел:

$$n_{\sigma} = \frac{4 \sum f_{\sigma}}{\pi d_{\sigma}^2} , \quad n_{\mu} = \frac{4 \sum f_{\mu}}{\pi d_{\mu}^2} , \quad (18)$$

шаг установки больших и малых сопел:

$$S_{\sigma} = \frac{\pi d_n}{n_{\sigma}} , \quad S_{\mu} = \frac{\pi d_n}{n_{\mu}} . \quad (19)$$

## Библиографический список

1. Иванов Ю.В. Основы расчёта и проектирования газовых горелок. М., Гостоптехиздат, 1963.
2. Хзмалян Д.М., Каган Я.А. Теория горения и топочные устройства. М., “Энергия”, 1976.
3. Тюльпанов Р.С. Горелочные устройства в целлюлозно-бумажной промышленности. Учебное пособие. Л., ЛТА, 1977.
4. Липов Ю.М. Основы топочных процессов. (Конспект лекций). М., “Энергия”, 1969.
5. Частухин В.И., Частухин В.В. Топливо и теория горения. К., “Выща школа”, 1989.
6. Сидельковский Л.Н., Юренев В.Н. Котельные установки промышленных предприятий. М., Энегатоиздат, 1988.
7. Мурзаков В.В. Основы теории и практики сжигания газа в паровых котлах. М., “Энергия”, 1969.
8. Двойнишников В.А., Деев Л.В., Изюмов М.А. Конструкция и расчёт котлов и котельных установок. М., “Машиностроение”, 1988.
9. Демидов П.Г. Горение и свойства горючих веществ, изд-во Министерства коммунального хозяйства РСФСР, М., 1962.
10. Кнорре Г.Ф. Топочные процессы, Государственное энергетическое издательство, М., Л., 1959.
11. Иссерлин А.С. Основы сжигания газового топлива: Справочное руководство. Л., “Недра”, 1980.
12. Тюльпанов Р.С. Топочные процессы в целлюлозно-бумажной промышленности. Учебное пособие. Л., ЛТА, 1977.
13. Зельдович Я.Б. Теория горения и детонации газов. Изд-во АН СССР, 1944.
14. Тюльпанов Р.С., Белоусов В.Н., Иванов А.Н., Лебле М.О. Горелка, позволяющая снизить эмиссию оксидов азота.....



15. Belousow W., Krimmling J., Oelker J. Matherielle und mathematische Modellierung von Feuerraum- und Flammenströmungen in Hinblick auf die Verbrennung von Problemkohlen. Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden, Heft 2, 1990.
16. Belousow W. Experimentelle Untersuchung und mathematische Beschreibung des brennernen Strömungsfeldes von Drallbrennern, Dissertation A, Dresden, 1990.
17. Тюльпанов Р.С., Белоусов В.Н., Иванов А.Н. Разработка трёхканальной газовой горелки, позволяющей снизить эмиссию оксидов азота. Проблемы экономии топливно-энергетических ресурсов на промпредприятиях и ТЭС. Межвуз. сбор. науч. трудов, вып.8, 1997, СПбГТУРП.
18. Вулис П.А., Ярин Л.П. Аэродинамика факела. Л., Энергия, 1978.
19. Померанцев В.В и др. Основы практической теории горения. Учебное пособие для студентов высших учебных заведений. Л., «Энергия», 1973