

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
“ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ”

КАФЕДРА «ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕПЛОФИЗИКА»

Конспект лекций  
по дисциплине  
«Специальные вопросы сжигания топлива»

для студентов очной и заочной форм обучения направления подготовки  
22.04.02 «Металлургия»  
магистерской программы «Промышленная теплотехника»

Донецк – 2018

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
“ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ”

КАФЕДРА «ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕПЛОФИЗИКА»

Конспект лекций  
по дисциплине  
«Специальные вопросы сжигания топлива»

для студентов очной и заочной форм обучения направления подготовки  
22.04.02 «Металлургия»  
магистерской программы «Промышленная теплотехника»

РАССМОТРЕНО  
на заседании кафедры  
технической теплофизики  
Протокол №12 от 31.05.2018 г.

Донецк-2018

УДК 621.78.064:622.6/8  
ББК 3 350.4  
Д 75

Составила: ст. преп. Дробышевская Ирина Павловна

303 с., табл. 22, рис. 153, библи. 38, приложений 17

В конспекте лекций по специальным вопросам сжигания и термической переработке топлива для студентов направления «Металлургия» изложены специальные вопросы по сжиганию твердых, жидких и газообразных топлив. Особое внимание уделено поверхностному горению, особым случаям сжигания топлив. Приведены методики расчета конверсии газов, газогорелочных устройств и форсунок, а также примеры их расчетов. Рассмотрены конструкции и дано краткое описание топливосжигающих устройств. Кратко изложена охрана окружающей среды и намечены мероприятия по снижению вредных выбросов в атмосферу при сжигании топлив. Значительное место уделено переработке жидкого, твердого и газообразных топлив.

# СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	8
1 СЖИГАНИЕ ГАЗООБРАЗНОГО ТОПЛИВА.....	11
1.1 Факельный метод сжигания газообразного топлива....	14
1.2 Горелочные устройства для сжигания газа в промышленных печах.....	18
1.2.1 Требования предъявляемые к газовым горелкам и их выбор.....	18
1.2.2 Основные требования к системе генерации тепла в теплотехническом агрегате.....	18
1.2.3 Основные характеристики горелок.....	19
1.2.4 Требования к газовым горелкам.....	20
1.2.5 Техническая характеристика газогорелочных устройств (паспорт).....	20
1.3 Классификация горелочных устройств.....	21
1.3.1 Основные показатели горелочных устройств.....	22
1.4 Способы обозначения горелок в технической литературе.....	24
1.5 Расчет горелочных устройств.....	37
1.5.1 Выбор числа и производительности горелок.....	37
1.5.2 Выбор коэффициента расхода воздуха.....	38
1.5.3 Расчет истечения газа из отверстий .....	39
1.6 Расчет прямоточных дутьевых горелок.....	44
1.6.1 Первый вариант расчета.....	45
1.6.2 Второй вариант расчета.....	49
1.6.3 Расчет газовыпускных отверстий.....	50
1.6.4 Расчет глубины проникновения струи газа в воздушный поток.....	53

1.7	Расчет инжекционных горелок.....	57
1.8	Расчет подовой горелки.....	59
1.8.1	Работа газовых горелок в нерасчетных режимах.....	64
1.9	Термическая переработка газообразного топлива.....	66
1.9.1	Методика расчета равновесных составов продуктов конверсии углеводородов.....	68
1.9.2	Определение температуры процесса конверсии углеводородов.....	72
2	ПОВЕРХНОСТНОЕ ГОРЕНИЕ ГАЗОВ.....	76
2.1	Сжигание газа в пористых или перфорированных средах или насадках.....	77
2.2	Сжигание газоздушных смесей при внезапном расширении.....	79
2.3	Сжигание газа на раскаленных огнеупорах.....	81
2.4	Сжигание газов (смеси) в малых объемах с сильно развитой контактирующей поверхностью.....	83
3	ГОРЕНИЕ ЖИДКИХ ТОПЛИВ.....	85
3.1	Горение жидкости со свободной поверхности.....	85
3.2	Горение капли жидкого топлива.....	88
3.3	Сжигание жидких топлив в факеле.....	89
3.3.1	Распыление жидкого топлива.....	90
3.3.2	Радиация факела жидкого топлива.....	92
3.4	Устройства для сжигания топлив.....	93
3.4.1	Классификация форсунок.....	94
3.5	Методика расчета форсуночных устройств.....	104
3.5.1	Расчет центробежных механических форсунок.....	104
3.5.2	Расчет прямоточных пневматических форсунок низкого давления.....	113
3.5.3	Расчет паровых и пневматических форсунок высокого давления вихревого типа.....	114

3.6 Термическая переработка жидкого топлива.....	117
3.6.1 Термический крекинг жидкого топлива.....	117
3.6.2 Пиролиз жидкого топлива.....	119
4 СЖИГАНИЕ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА.....	121
4.1 Сжигание твердого топлива в факеле.....	121
4.1.1 Основы пылеприготовления и физические свойства пыли.....	122
4.2 Кинетический и диффузионный режимы горения угольных частиц.....	126
4.3 Горение угольных частиц в факеле.....	129
4.3.1 Методика расчета пылеугольных горелок.....	132
4.4 Термическая переработка твердого топлива.....	140
4.4.1 Сухая перегонка твердого топлива.....	142
4.4.2 Газификация твердого топлива.....	144
5 ОСОБЫЕ СЛУЧАИ СЖИГАНИЯ ТОПЛИВ.....	150
5.1 Сжигание топлива в атмосфере чистого кислорода или в воздухе, обогащенном кислородом.....	150
5.2 Каталитическое горение.....	153
5.3 Топливные элементы.....	154
5.4 Сжигание водомазутных эмульсий.....	156
5.5 Сжигание водоугольных суспензий.....	158
5.6 Сжигание топлива в циклонах.....	160
5.7 Наложение на факел дополнительного тепла за счет электроэнергии.....	160
5.7.1 Сжигание в камере сгорания МГД – генераторе.....	161
5.8 Использование низкочастотных пульсаций и акустических колебаний при горении топлива.....	163
5.9 Циркулирующий кипящий слой.....	164

5.10	Технология производства электроэнергии с использованием газификации угля в кипящем слое под давлением .....	166
5.11	Технология производства электроэнергии с использованием газификации пылеугольного топлива .....	172
5.12	Перспективы использования в металлургии и теплоэнергетике технологий газификации угля в расплаве шлака .....	174
6	ЗАЩИТА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ОТ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПРИ СЖИГАНИИ ТОПЛИВА .....	179
6.1	Мероприятия по снижению загрязнения окружающей среды.....	184
6.2	Влияние рециркуляции продуктов сгорания и ступенчатого сжигания топлива на образование окиси азота..	190
	ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК .....	196
	ПРИЛОЖЕНИЕ А - ПРОМЫШЛЕННЫЕ ГОРЕЛКИ И ФОРСУНКИ.....	199
	ПРИЛОЖЕНИЕ Б - ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА КОНВЕРСИИ УГЛЕВОДОРОДОВ, ГОРЕЛОЧНЫХ И ФОРСУНОЧНЫХ УСТРОЙСТВ .....	231
	ПРИЛОЖЕНИЕ В - ЛОГАРИФМЫ КОНСТАНТ РАВНОВЕСИЯ РЕАКЦИЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В РАСЧЕТАХ ПРОЦЕССОВ КОНВЕРСИИ УГЛЕВОДОРОДОВ.....	257
	ПРИЛОЖЕНИЕ Г - СРЕДНИЕ УДЕЛЬНЫЕ ТЕПЛОЕМКОСТИ ГАЗОВ, КДЖ/М <sup>3</sup> ·К .....	258
	ПРИЛОЖЕНИЕ Д - МЕТОДИКА ПО ВЫБОРУ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ, ВИДА ТОПЛИВА, СПОСОБА ЕГО СЖИГАНИЯ, ГАЗОГОРЕЛОЧНЫХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ КОНКРЕТНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕС-	

КОГО ПРОЦЕССА.....	259
ПРИЛОЖЕНИЕ Е - ОПИСАНИЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ ТОПЛИВОСЖИГАЮЩИХ УСТРОЙСТВ.....	270
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж – УДЕЛЬНАЯ ЭНТАЛЬПИЯ ГАЗА.....	288
ПРИЛОЖЕНИЕ К – ДИАГРАММА I-T .....	289
ПРИЛОЖЕНИЕ Л - ТЕПЛОВЫЕ ЭФФЕКТЫ РАЕКЦИЙ ГО- РЕНИЯ УГЛЕВОДОРОДОВ .....	290
ПРИЛОЖЕНИЕ М - ЖАРОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ, °С НЕ- КОТОРЫХ ТОПЛИВ.....	291
ПРИЛОЖЕНИЕ Н - ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ РАСХОДЫ ВОЗДУХА $L_{1000}$ И ОБЪЕМ ДЫМА $V_{1000}$ НА 1000 КДЖ ПРИ СЖИГАНИИ РАЗЛИЧНЫХ ТОПЛИВ.....	292
ПРИЛОЖЕНИЕ П - СОСТАВ И НЕКОТОРЫЕ ТЕПЛОТЕХ- НИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГАЗООБРАЗНОГО ТОПЛИВА .....	293
ПРИЛОЖЕНИЕ Р - ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИ- СТИКА НЕФТЕПРОМЫШЛЕННЫХ (СОПУТСТВУЮЩИХ) ГАЗОВ .....	294
ПРИЛОЖЕНИЕ С - СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ТЕПЛОТЕХНИЧЕ- СКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОПЛИВ .....	295
ПРИЛОЖЕНИЕ Т - СОСТАВ И ХАРАКТЕРИСТИКА ДЫМО- ВЫХ ГАЗОВ РАЗНЫХ ТОПЛИВ.....	296
ПРИЛОЖЕНИЕ У - РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ УВЕЛИЧЕ- НИЯ ТЕПЛОЙ МОЩНОСТИ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ АГ- РЕГАТОВ (БЕЗ РЕКОНСТРУКЦИИ). .....	297
ПРИЛОЖЕНИЕ Ф - ПЕРЕВОД ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОЙ УС- ТАНОВКИ С ОДНОГО ВИДА ТОПЛИВА НА ДРУГОЙ...	301



## ВВЕДЕНИЕ

Одним из направлений улучшения показателей топливно-энергетического баланса (ТЭБ) Украины является разработка нетрадиционных способов получения тепловой энергии, а также улучшения технико-экономических показателей, существующих традиционных способов получения тепла. Топливо-энергетический баланс Украины состоит в основном из тепла полученного путем сжигания твердого, жидкого, газообразного топлива, а также за счет использования атомной энергии. Основную долю тепла, примерно 85%, приходится на органическое и газообразное топливо, и только 15% составляет доля тепла, получаемого от использования атомной энергии.

В топливно-энергетическом балансе Украины, до конца нынешнего столетия, главное значение будет иметь органическое топливо (уголь, нефть, природный газ и др.). Поэтому проблема защиты окружающей среды приобрела большое значение в настоящее время в связи с огромными масштабами добычи полезных ископаемых и их недостаточно совершенным использованием. Добыча полезных ископаемых достигла огромных размеров и по прогнозам человечеству хватит органического топлива не более чем на 150 лет. Запасы нефти и газа будут исчерпаны раньше, чем угля. В ближайшие годы в народном хозяйстве развитых стран широкое распространение получит твердое топливо. К 2000 году в ТЭБ распределится следующим образом: 84% - органическое топливо, 15% - атомная энергия, 1% - гидроэнергия.

Доля нефти и газа в ТЭБ будет увеличиваться, а доля угля уменьшаться. Большое значение приобретают виды топлива получаемые из искусственных углей. При этом доля газового топлива еще выше т. к. 20% углей подвергаются коксованию, при

котором получается коксовый газ, а кокс применяемый в доменных печах при производстве чугуна дает побочный продукт - доменный газ. Кроме того при переработке нефти получается значительное количество газов нефтепереработки.

За последние 40 лет, начиная с 1957 года широкое распространение в промышленности и в быту получил природный газ, он вытеснил генераторный газ. Структура потребления природного газа следующая: 65% добываемого природного газа используется в промышленности, 25% - на электростанциях, 10% - в коммунальном хозяйстве.

В воздушную атмосферу планеты выбрасывается более 1 млрд. т. вредных веществ, которые свидетельствуют о несовершенстве существующих технологий. Исключить образование опасных очагов загрязнения в технике можно:

- улавливанием или очисткой вредных выбросов, а затем их рациональным использованием;
- подавление процесса образования вредных веществ, которые возникают в топках и других аппаратах в результате протекания химических реакций, в том случае, если использование этих веществ является экономически невыгодным;
- подготовкой топлива с целью удаления из него вредных компонентов путем проведения предварительных процессов газификации, гидроионизации, высокоскоростного пиролиза и т.д.;
- введением катализаторов и добавок в топку, где осуществляется процесс горения;

Особое внимание следует обратить на конечные продукты реакции, покидающие топливоиспользующие установки и на состав полных и неполных продуктов сжигания.

Выбросы вредных веществ, при сжигании всех видов топлив должны быть минимальны и не превышать предельно допустимые концентрации (ПДК).

Происхождение вредных веществ, выбрасываемых в атмосферу с уходящими газами тепловых агрегатов, в которых сжигается минеральное топливо, обусловлено технологическими причинами и наличием в твердом и жидком топливе неорганических веществ: твердых балластных частиц, сернистых соединений, переходящих в продукты сгорания. Кроме того, при сжигании всех видов минеральных топлив в процессе горения образуются вредные вещества органического происхождения (окись углерода, углеводороды) и неорганического происхождения ( $\text{NO}_x$ ), концентрация которых в продуктах сгорания в значительной степени зависит от организации процесса горения, конструкции теплового агрегата и особенности протекания процесса теплоотдачи от потока продуктов сгорания к поверхностям нагрева или технологического процесса нагрева, плавления и других видов тепловой обработки материалов.

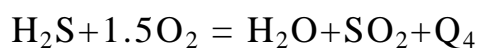
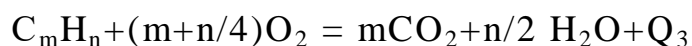
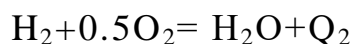
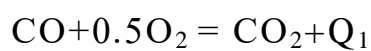
При разработке рекомендаций при снижении образования вредных веществ при сжигании газообразного и жидкого топлив в энергетических и технологических тепловых агрегатах следует исходить из особенностей их тепловой работы, опыта применения в промышленных условиях технических методов, способствующих снижению образования вредных веществ, а также из требования сохранения КПД теплового агрегата.

## 1 СЖИГАНИЕ ГАЗООБРАЗНОГО ТОПЛИВА

**Горение** – процесс взаимодействия топлива с окислителем, сопровождающийся выделением тепла, а иногда и света.

**Горение** - химический процесс соединения горючих составляющих топлива с кислородом с быстрым подъемом температуры.

Основными горючими составляющими газообразного топлива являются : $H_2, CO, C_mH_n, H_2S$ . Сжигание может быть полным с  $\alpha > 1.0$  и неполным с  $\alpha < 1.0$ . Продукты горения:  $CO_2, H_2O, SO_2, N_2, O_2$ <sup>изб.</sup> – полное горение, при неполном горении наряду с обычными продуктами горения появляются и горючие компоненты топлива ( $CO, C, H_2, CH_4$ ). Основные стехиометрические уравнения реакций горения следующие:

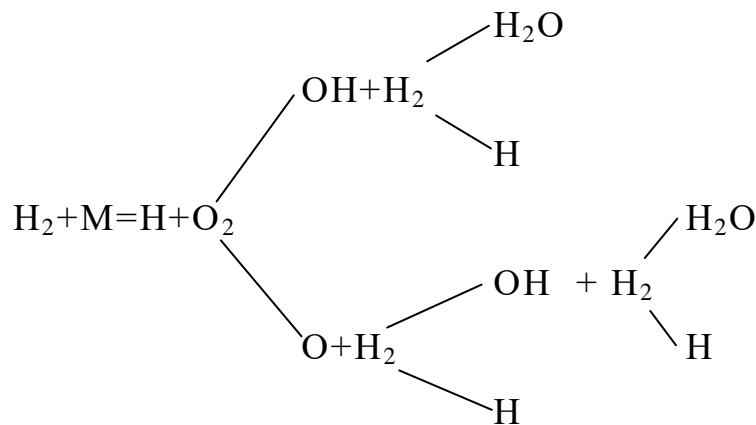
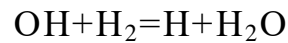
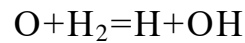
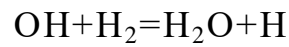
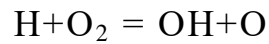
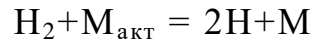


Эти реакции не объясняют механизма горения составляющих топлива, а являются лишь результирующими процесса горения, т.е. показывают лишь исходные реагирующие вещества и конечные продукты, связывая их условиями материального баланса.

Согласно учению Н.Н. Семенова, а также ряда других ученых, превращение исходных веществ в конечные, происходит не сразу, а с образованием промежуточных продуктов, содержащих химически активные частицы в виде атомов водорода, кислорода и гидроксильных радикалов и других неустойчивых соединений. Промежуточные продукты легко вступают в дальнейшие реак-

ции, в результате которых образуются как конечные продукты реакции, так и новые активные центры. Таким образом, возникает непрерывная цепь превращений в каждом звене, которое образует определенное количество конечного продукта. Рассмотрим цепные реакции горения  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ .

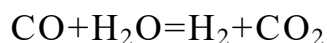
Примером цепной реакции служит реакция горения водорода:



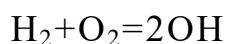
Из этой схемы видно, что взаимодействие одного атома водорода, появившегося в результате разрушения молекулы, с молекулой кислорода, приводит к образованию двух молекул воды и трех новых атомов водорода.

Образовавшиеся активные центры могут исчезнуть, и тогда цепь обрывается, т.е. реакция затухает. В противном случае аналогичная цепь превращений продолжается. Рассмотренная реакция будет разветвленной, если все три или хотя бы два атома водорода будут началом новым цепям.

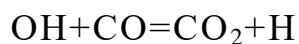
**Горение окиси углерода (СО).** Сухая окись углерода нагретая до 700°C, практически не соединяется с кислородом. Подъем температуры выше 700°C приведет к протеканию медленного окисления СО. Однако, добавка водяных паров в малом количестве резко изменяет картину, т.к. наряду с СО и О<sub>2</sub> появляется атомарный водород(Н) и гидроксид(ОН) и реакция протекает как гомогенная во всем объеме смеси по следующим уравнениям:



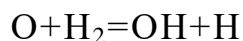
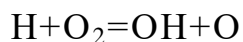
1. Зарождение цепи.



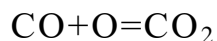
2. Продолжение цепи.



3. Разветвление цепи.



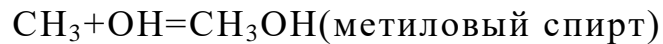
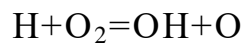
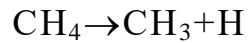
4. Обрыв цепи.



**Горение углеводородов.** Цепной механизм горения углеводородов пока изучен еще недостаточно. Прочные соединения водорода с углеродом разрушаются медленно, проходя последовательно через различные промежуточные стадии.

Сложные углеводороды, например эфиры, при низких температурах(170-350°C) медленно окисляются, образуя альдегиды, давая холодное пламя, которое после некоторого разогрева реагентов переходит в обычное горение.

**Горение метана.** При нагревании метана СН<sub>4</sub> происходит разложение его на атом водорода и радикал СН<sub>3</sub>. Этот процесс протекает по следующим реакциям:



Формальдегид - нестойкое соединение, легко разлагается на окись углерода и водород, которые вступают в реакцию по ранее приведенным схемам. Спектральный анализ пламени показывает, что при горении углеводородов образуются CO, H, гидроксильные группы, метилспирт, формальдегид и другие соединения. При недостатке окислителя при сжигании углеводородов получается сажистый углерод, окись углерода и H<sub>2</sub>.



### 1.1 Факельный метод сжигания газообразного топлива

При сжигании газообразного топлива применяют так называемый факельный метод сжигания. Факел - это частный случай пламени, когда топливо и воздух поступают в рабочее пространство в виде струй, которые постепенно перемешиваются друг с другом и сгорают. Поэтому форма и длина факела обычно вполне определенная и соответствует форме и длине рабочего пространства печи. Для протекания процесса сжигания газообразного топлива должны быть созданы следующие условия:

- к горючему газу необходимо подвести достаточное количество воздуха;
- смешать газ с воздухом (газовоздушная смесь должна быть в определенных концентрационных пределах, т.е. в пределах воспламенения);

- газоздушная смесь должна быть подогрета до температуры воспламенения или должен быть источник зажигания;
- газоздушная смесь в зону горения должна поступать со скоростью равной нормальной скорости распространения пламени;
- постоянный отвод продуктов сгорания.

Горение газоздушной смеси происходит с определенной скоростью  $U_n$  – нормальная скорость горения. При нормальном горении, скорость перемещения пламени определяется исключительно процессом теплопроводности, и поэтому не зависит от того, движется ли горячая смесь или нет. Такая скорость, отнесенная к холодному газу, получила название нормальной скорости.

$$U_n = d_n / dt, \text{ м/с}$$

где  $d_n$  – расстояние на которое перемещается фронт пламени за время  $dt$ .

Продолжительность горения газообразного топлива состоит из времени смесеобразования и времени горения (химической реакции окисления)

$$\tau = \tau_{см} + \tau_{х.р.}$$

где  $\tau_{см}$  – продолжительность диффузии горючего газа и окислителя, приводящая к созданию однородной смеси;

$\tau_{х.р.}$  – продолжительность горения, начиная от разогрева смеси до завершения реакции.

В зависимости от способа подачи воздуха и газа возможны три способа сжигания газообразного топлива: диффузионный, кинетический и смешанный (рисунок 1.1-1.3). При диффузионном способе газ и воздух к месту горения подается отдельными струями и горение смеси происходит за счет взаимной диффузии газа и кислорода. Продолжительность горения определяется про-



должительностью смесеобразования т.к. время протекания химической реакции можно считать равным нулю.

### Диффузионный.

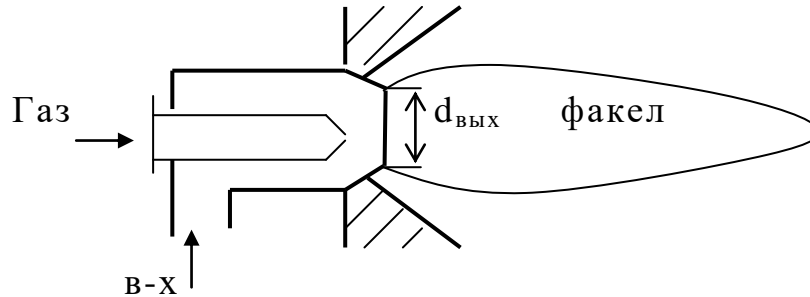


Рисунок 1.1 – Схема диффузионного способа

Смесеобразование происходит непосредственно в топке или в рабочем пространстве печи  $\tau_{\text{гор}} = \tau_{\text{см.}}$ ;  $\tau_{\text{х.р.}} = 0$ . Самый длинный факел  $L_{\text{ф}} = 200-300 d_{\text{ВЫХ}}$ ,  $L_{\text{см.}} = 0$ .

Обычно при диффузионном способе сжигания  $\alpha > 1$  и составляет 1.15-1.25

### Кинетический.

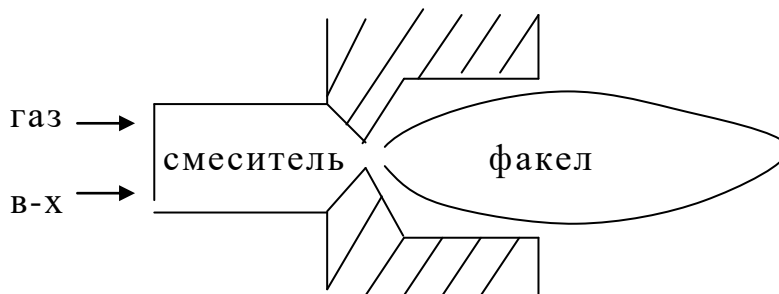


Рисунок 1.2 – Схема кинетического способа сжигания

При кинетическом горении в камеру сгорания подается заранее подготовленная газовоздушная смесь и продолжительность горения определяется только кинетикой химической реакции,  $\tau_{\text{гор}} = \tau_{\text{х.р.}}$ ;  $\tau_{\text{см.}} = 0$ . Самый короткий факел  $L_{\text{ф}} = 5-7 d_{\text{ВЫХ}}$ ;  $\alpha = 1.02-1.1$ ;  $L_{\text{см.}} = 30-40 d_{\text{ВЫХ}}$

**Смешанный** способ сжигания, схема которого представлена на рисунке 1.3. При сжигании смеси газа с недостаточным ко-

личеством для полного горения воздухом недостающее количество воздуха, путем диффузии, поступает из окружающей среды.

$\alpha' = 0.5 - 0.6$  – коэффициент первичного расхода воздуха.

**Пример:** При сжигании метана  $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 = \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$

На 1 моль  $\text{CH}_4$  необходимо 2 моля  $\text{O}_2$ . Смешали и подожгли.

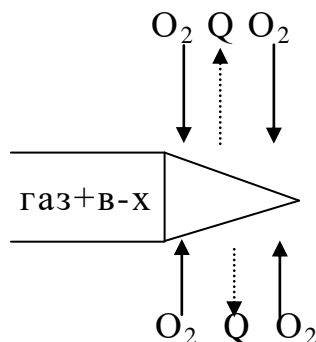
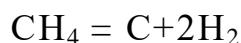


Рисунок 1.3 – Схема смешанного способа сжигания

При сгорании образовался 1 моль двуокиси углерода и 2 моля водяных паров. В случае недостатка кислорода углеводородное топливо термически неустойчиво и разлагается:



Образовавшийся углерод, нагретый до температуры продуктов сгорания, светится. При сжигании доменного газа (CO) факел образуется несветящийся. В зависимости от характера движения различают ламинарное и турбулентное горение. В промышленности, как правило, организуют турбулентное горение. Так как при этом интенсифицируются процессы горения топлива и передача тепла от горящего факела. Для развития турбулентного диффузионного факела большое значения имеет интенсивность турбулентного перемешивания. В связи с этим для оценки процессов переноса в факеле необходимо знать уровень турбулентности, представляющий собой отношение  $\sqrt{\overline{U'^2}} / \overline{U}$ , где  $\sqrt{\overline{U'^2}}$  и  $\overline{U}$  – соответственно пульсация и усредненная скорость потока.

## **1.2 Горелочные устройства для сжигания газа в промышленных печах**

### **1.2.1 Требования предъявляемые к газовым горелкам и их выбор**

**Горелка** – устройство для подачи к месту горения определенных количеств газа и воздуха, для создания условий их перемешивания, воспламенения и горения.

Нет научно обоснованных методов по выбору горелок. Для выбора горелок необходимо учитывать:

- требование к системе отопления со стороны технологического процесса;
- свойства горелочных устройств (длина и форма факела, пределы регулирования производительности и т.д.);
- теплообменные характеристики факела и др.;

### **1.2.2 Основные требования к системе генерации тепла в теплотехническом агрегате**

Требования к системе генерации тепла следующие:

- обеспечение высокой удельной производительности теплотехнического агрегата при высоком качестве продукции;
- высокая экономичность топливоиспользования (выбор оптимальных тепловых схем, хорошая организация аэродинамики, выбор теплоизоляции т.е. комплекса мероприятий).

Следует отметить, что иногда технологические процессы требуют ухудшения экономичности топливоиспользования (безокислительный нагрев заготовок под прокатку т.е. процесс сжи-

гания топлива ведут, создавая восстановительную атмосферу в теплотехническом агрегате,  $\alpha=0.5-0.8$ ).

### 1.2.3 Основные характеристики горелок

**Давление газа.** Горелки могут работать на различных избыточных давлениях газа:

- низкого давления до 5 кПа
- среднего давления от 5 до 300 кПа
- высокого давления более 300 кПа

Давление газа может быть минимальным, номинальным и максимальным.

Номинальное давление газа это то давление, на которое рассчитана горелка. Min и max – диапазон давления в котором горелка работает устойчиво.

**Тепловая нагрузка горелки** – это количество тепла, выделяющееся в единицу времени при сжигании газа поданного через горелку.

$$Q_P = V_{\Gamma} \cdot Q_{H^P} = \frac{M^3}{c} \cdot \frac{kJ}{M^3} = kBT$$

где:  $V_{\Gamma}$  – расход газа через горелку,  $m^3/c$

$Q_{H^P}$  – теплота сгорания газа,  $kJ/m^3$ .

Различают три вида тепловой нагрузки: минимальную, номинальную и максимальную.

**Диапазон устойчивой работы** – это отношение минимальной тепловой нагрузки к максимальной.

$$n = \frac{Q_{p.min}}{Q_{p.max}} = \sqrt{\frac{P_{min}}{P_{max}}}$$

**Коэффициент первичного расхода воздуха  $\alpha'$** , который показывает, какое количество воздуха необходимое на сжигание топлива поступает непосредственно через смесительное устройство горелки. Для горелок, применяемых в народном хозяйстве,  $\alpha'=0.5 - 0.6$ . Остальное количество воздуха при  $\alpha_{вт}=0.5 - 0.6$  поступает из окружающей среды.

#### 1.2.4 Требования к газовым горелкам

Газовые горелки должны:

- быть компактными, т.е. иметь минимально возможные размеры и металлоемкость (расход металла на единицу мощности), кг/кВт.

$$M = \frac{m}{Q_{\Gamma}}$$

- удобство зажигания, регулирование производительности, автоматического поддержания соотношения топливо-воздух;
- простота изготовления, монтажа и ремонта;
- долговечность и надежность в работе;
- малый уровень шума и вибраций (при номинальном режиме не должен превышать 85 децибел. При замере на расстоянии 1 метра от горелки и высоте от пола 1.5 метра);
- низкое гидравлическое сопротивление по воздуху и газу;
- небольшие габариты, вес и стоимость;
- легкость перехода на резервный вид топлива (с газа на мазут).

#### 1.2.5 Техническая характеристика газогорелочных устройств (паспорт)

Паспорт горелки включает:

- вид газа и  $Q_H^P$ ;
- тепловая мощность  $Q_{\max}$ ,  $Q_{\text{ном}}$ ,  $Q_{\min}$  (МВт);
- необходимое давление газа  $P_{\max}$ ,  $P_{\text{ном}}$ ,  $P_{\min}$ ;
- давление дутьевого воздуха  $P_{\max}$ ,  $P_{\text{ном}}$ ,  $P_{\min}$ ;
- пределы регулирования производительности (10-100%);
- безразмерная длина факела в калибрах.
- рекомендуемые значения  $\alpha$  и ожидаемые значения  $q_{x.n}$  с учетом особенностей камер сгорания;
- габариты  $a \times b \times c$ , вес, стоимость;
- ожидаемая концентрация вредных выбросов окислов  $NO_x$ , мг/м<sup>3</sup>.

### 1.3 Классификация газогорелочных устройств (ГГУ)

Имеется ГОСТ 21204-83 который классифицирует все газовые горелки по следующим признакам:

- способ подачи компонентов (за счет свободной конвекции, разряжения в рабочем пространстве, эжекция воздуха газом и т.д.);
- степень подготовки горючей смеси (без предварительного смешения, с частичным предварительным смешением, незавершенное предварительное смешение);
- скорость истечения продуктов сгорания при номинальном режиме, при рабочей температуре, м/с (низкая до 20, средняя 20-70, высокая более 70);
- характер потока истекающего из горелки (прямоточный и закрученный);
- номинальное давление газа перед горелкой, Па (низкое до 5000, среднее  $5000-30 \cdot 10^3$ , высокое – свыше  $30 \cdot 10^3$ );

- возможность регулирования характеристик факела (с регулируемым факелом и с нерегулируемым);
- возможность регулирования коэффициента избытка воздуха (с регулируемым  $\alpha$  и с нерегулируемым);
- локализация зоны горения (в огнеупорном туннеле, на поверхности катализатора, в зернистой огнеупорной массе, на огнеупорной поверхности и т.д.);
- возможность использования тепла продуктов сгорания (без подогрева воздуха, с подогревом газа и воздуха);
- степень автоматизации (с ручным управлением, полуавтоматическим, автоматическим).

### 1.3.1 Основные показатели газогорелочных устройств (ГГУ)

Основными показателями ГГУ являются: максимальная производительность, коэффициент рабочего регулирования, номинальное давление, относительная длина факела и др. Рассмотрим эти показатели.

Вся мощность максимально достигнутая при длительной нормальной работе горелки с химической неполнотой сгорания не превосходящей установленные нормы при принятом минимальном коэффициенте расхода воздуха  $\alpha$  - **максимальная производительность горелки**. Коэффициент рабочего регулирования горелки – есть отношение номинальной тепловой мощности горелки к минимально рабочей,  $k_{р.р.} = \frac{Q_{ном}}{Q_{мин}}$ .

**Номинальное давление газа** (воздуха) – избыточное давление газа (воздуха) перед горелкой после всех регулирующих и запорных органов при номинальной мощности горелки.

**Относительная длина факела.** За относительную длину факела принимается расстояние, измеренное от выходного сечения сопла горелки по оси факела, до точки, в которой содержание  $\text{CO}_2 = 0.95 \text{ CO}_2^{\text{max}}$  (рисунок 1.5).

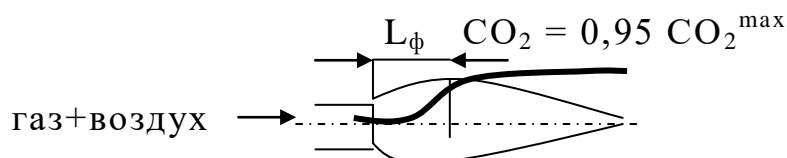


Рисунок 1.5 – Схема поясняющая длину факела

При сжигании природного газа  $\text{CO}_2^{\text{max}} = 11.8\%$ . Длина факела  $L_\phi$  при  $Q_{\text{ном}}, \alpha = 1.0$ ;  $L_\phi = A \cdot d_{\text{вых.сеч.гор.}}$ ;  $L_\phi = (5 \dots 6) \cdot d_{\text{вых}}$  – кинетические горелки;  $L_\phi = (100 \dots 200) d_{\text{вых}}$  – диффузионные горелки.

**Химическая неполнота сгорания.** Содержание CO в продуктах сгорания с температурой до  $1400^\circ\text{C}$ . на выходе из камеры сгорания теплового агрегата в пересчете на сухие продукты сгорания (при  $\alpha = 1.0$ ) не должно быть более  $0.05\%$  по объему во всем диапазоне регулирования.

**Потери тепла от химической неполноты сгорания** на выходе из камеры горения теплового агрегата в диапазоне рабочего регулирования горелки не должно быть более  $0.4\%$ .

При  $Q_{\text{ном}} > 0.1$  МВт горелки должны быть снабжены запальным устройством (переносным или стационарным).

**Шумовая характеристика газогорелочных устройств.** Уровень шума создаваемый ГГУ измеренный на расстоянии  $1\text{ м}$  и на высоте  $1.5\text{ м}$  от уровня рабочей площадки, не должен превышать  $85\text{ дБ}$ . В таблице 1.1 приведены коэффициенты рабочего регулирования различных горелок.



Таблица 1.1 – Коэффициенты рабочего регулирования мощности горелок и коэффициент расхода воздуха в зависимости от класса горелок

Класс горелки по способу подачи воздуха и смесеобразования	$K_{p.p.}$ , не менее	$\alpha$ , не менее
Горелки с принудительной подачей воздуха с полным предварительным смешением; инжекционные горелки с полным предварительным смешением	3 (30-100%)	1.05
Горелки с принудительной подачей воздуха с неполным предварительным смешением	4 (25-100%)	1.08
Горелки с принудительной подачей воздуха без предварительного смешения; горелки с подачей воздуха за счет разрежения без предварительного смешения; инжекционные горелки с частичным предварительным смешением	5 (20-100%)	1.15
Беспламенные горелки	2 (50-100%)	1.02

#### 1.4 Способы обозначения горелок

В технической литературе можно встретить самые различные обозначения горелок:

- по фамилии автора (горелка Грошева, Казанцева и т.д.);
- по названию организации разработавшей горелку (горелка ЗИЛ типа ТЛ-100 (завод имени Лихачева теплотехническая лаборатория  $d_{вых}=100$ );

- по первым буквам названия (горелка типа ГНП-2 (горелка низкого давления для природного газа 2- порядковый номер горелки в серии));
- иногда название горелки и фамилия автора (горелка типа ИГК-60 инжекционная горелка Казанцева,  $V_{Г}=60\text{м}^3/\text{ч}$ );
- горелки типа ПИВ (переменный избыток воздуха).

Теперь рассмотрим более подробно классификацию горелок по различным способам, т.к. эта классификация часто встречается в технической литературе, которая приведена в таблице 1.2.

Таблица 1.2 - Общая классификация газогорелочных устройств

№	Признаки классификации	Группы (классы) ГГУ.
1	2	3
1.	Принцип смесеобразования.	1. Горелки внешнего смешения (диффузионные) 2. Горелки полного предварительного смешения (кинетические) 3. Горелки с частичным предварительным смешиванием 4. Горелки с незавершенным предварительным смешиванием 5. Диффузионно-кинетические (с регулируемой длиной факела)
2.	По способу подачи воздуха	1. Бездутьевые (за счет разряжения в камере сгорания) 2. Дутьевые (принудительная подача воздуха вентилятором) 3. Инжекционные (подача воздуха за счет энергии струи газа)

Продолжение таблицы 1.2

1	2	3
3.	По характеру движения воздуха или газо-воздушной смеси (ГВС)	1. Прямоточные горелки (не закручивается поток) 2. Вихревые
4.	По способу стабилизации факела	1. Свободные факела (диффузионный факел) 2. Стабилизация встречными и поперечными струями 3. Плохо обтекаемыми телами 4. Закруткой факела (аэродинамический прием) 5. Керамический туннель 6. Удар факела в поверхность или засыпку 7. Использование насадок и засыпок 8. Непрерывное электрозажигание
5.	По месту установки горелки	1. Фронтальные 2. Подовые 3. Сводовые 4. Погружного горения 5. Переносные горелки (запальные)
6.	По давлению газа	1. Низкое давление 5000 Па 2. Среднего давления от 5000 Па до 0.3 Мпа 3. Высокого давления $P_{изб} > 0.3 \text{ Мпа}$

## Продолжение таблицы 1.2

7.	По давлению дутьевого воздуха	1. Низкого давления (до 1000 Па работает с вентилятором низкого давления) 2. Среднего давления $1000\text{Па} < P_v < 3000\text{Па}$ (работает с вентилятором среднего давления) 3. Высокого давления $3000\text{Па} < P_v < 10000\text{Па}$ (работает с вентилятором высокого давления)
8.	По виду сжигаемого газа	1. Горелки для природного газа 2. Горелки для сжиженного газа 3. Горелки для доменного газа 4. Горелки для коксового газа

Рассмотрим более подробно ГГУ представленные в таблице 1.2, считая основным признаком классификация смесеобразования, что позволит обеспечить связь ГОСТа 21204-83 с технической литературой.

**Диффузионные горелки** (горелки внешнего перемешивания,  $\alpha' = 0$ ). Весь воздух, идущий на горение подается вентилятором или поступает из окружающей среды. Простые конструкции диффузионных горелок представлены на рисунке 1.6.

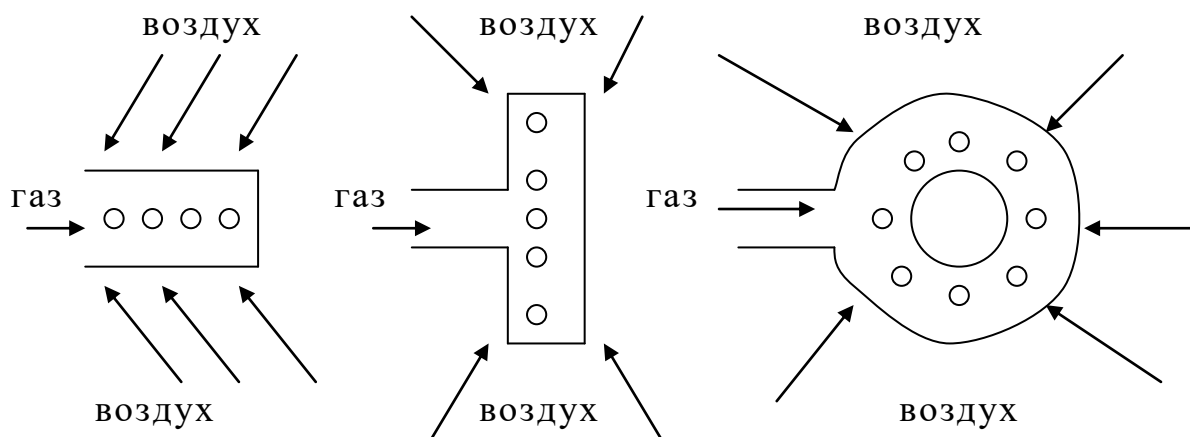


Рисунок 1.6 – Простейшие конструкции диффузионных горелок

Конструкции диффузионных горелок применяемых в народном хозяйстве приведены в приложении А.

Основные преимущества этих горелок:

- большая длина факела и высокая излучательная способность факела при сжигании углеводородных топлив (мартеновская, цементная печи, вращающаяся барабанная печь, печи для обжига извести, водогрейные котлы и т.д.);
- отсутствие проскоков пламени в горелку (нет смесительных устройств) позволяет обеспечить:
  - неограниченный подогрев компонентов горения
  - возможность работать на дутье обогащенном кислородом и в чистом кислороде;
  - высокая устойчивость факела в отношении его отрыва;
  - неограниченная мощность;
  - широкие пределы регулирования производительности (от 10 до 100%);
  - низкий уровень шума;

При малых нагрузках может быть прогар носика или проскок пламени в горелку, а максимальная производительность ограничивается отрывом факела. Нет проскока, нет необходимости охлаждать носик, горелки могут работать на любом давлении газа.

Основные недостатки:

1. Низкая интенсивность процесса горения, тепловыделения (большие габариты камер сгорания).

$$\frac{Q}{V} = 0.1 - 0.6 \text{ МВт/м}^3 \text{ - объемная плотность тепловыделения.}$$

где  $Q$  – тепловая мощность горелки, МВт;

$V$  – объем топки, м<sup>3</sup>.

2. Пониженная экономичность процесса горения. При сжигании с  $\alpha \geq 1.1$   $q_{x.n} \geq 0.5\%$ .

**Область применения.** Этот тип горелки применяется:

- в промышленных печах с протяженным рабочим пространством (мартеновские печи, стекловаренные печи, цементные, отражательные печи цветной металлургии, котлы малой, средней мощности и др.);
- при организации факела по высоте нагреваемого изделия (каупер доменной печи, простенок коксовых батарей).

**Основные конструкционные варианты горелок, применяемых в промышленности:**

- простая типа “труба в трубе”;
- “труба в трубе” (прямоточная, вихревая);
- горелки “труба в трубе” с многоструйной подачей газа (центральной или периферийной) прямоточные или вихревые.

**Кинетические горелки** (горелки с полным предварительным смешиванием):

- дутьевые кинетические горелки с многоструйной центральной или периферийной подачей газа;
- однопроводные инжекционные горелки (с активной газовой струей);
- двухпроводные инжекционные горелки (с активной воздушной струей);
- панельные горелки;
- инфракрасные излучатели;
- радиационные, чашечные (плоскопламенные);
- горелки местного и скоростного нагрева.

Основные конструкции приведены в приложении А.

**Основные преимущества горелок:**

1. Высокая интенсивность процесса горения (тепловыделение).  $Q:V=5-50\text{МВт/м}^3$  (малые габариты камер сгорания).

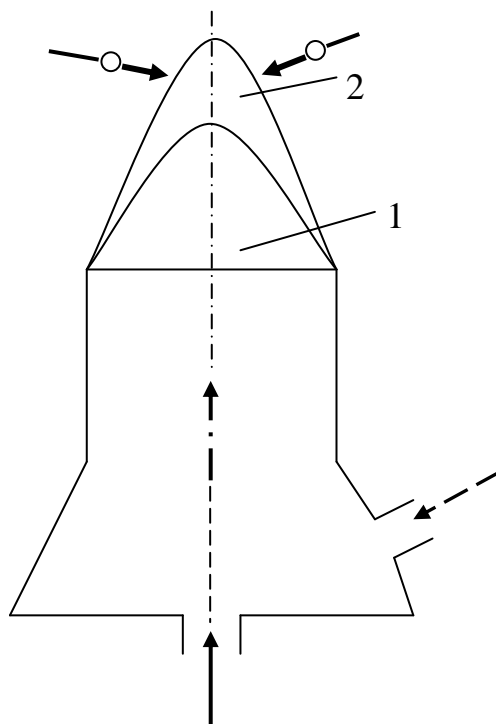
2. Повышенная экономичность процесса горения. При  $\alpha \leq 1.05-1.02$   $q_{x.n}=0$
3. Высокая чистота продуктов сгорания (пиролиз подавляется) – сажи нет.
4. Сжигание газа с низкой теплотой сгорания.

**Основными недостатками этого типа горелок являются:**

- возможность проскока пламени в смеситель. Чтобы исключить это необходимо: обязательное водяное охлаждение горелки, ограничение подогрева компонентов горения ( $t_{см} < t_{воспл}$ ), ограничение производительности (большая горелка – большой смеситель) обычно  $V_{п.г} < 250 \text{ м}^3/\text{ч}$ , ограничение повышения давления дутья;
- узкие пределы регулирования производительности;
- затруднительность работы на дутье, обогащенным кислородом и в чистом кислороде;
- высокий уровень шума;
- необходимость стабилизации факела в отношении его отрыва;
- громоздкость этих горелок из-за наличия смесителя.

Применяют эти горелки в котлах и печах малой и средней мощности. Этот класс горелок, кроме того, используется как горелки местного скоростного нагрева, в инфракрасных излучателях.

Горелки с частичным предварительным смешением (рисунк 1.6).



1-диффузионный факел; 2-кинетический факел;  
 ← — газ; ← — — — газозвудушная смесь (ГВС);  
 ← — — — первичный воздух; ← ○ — вторичный воздух.

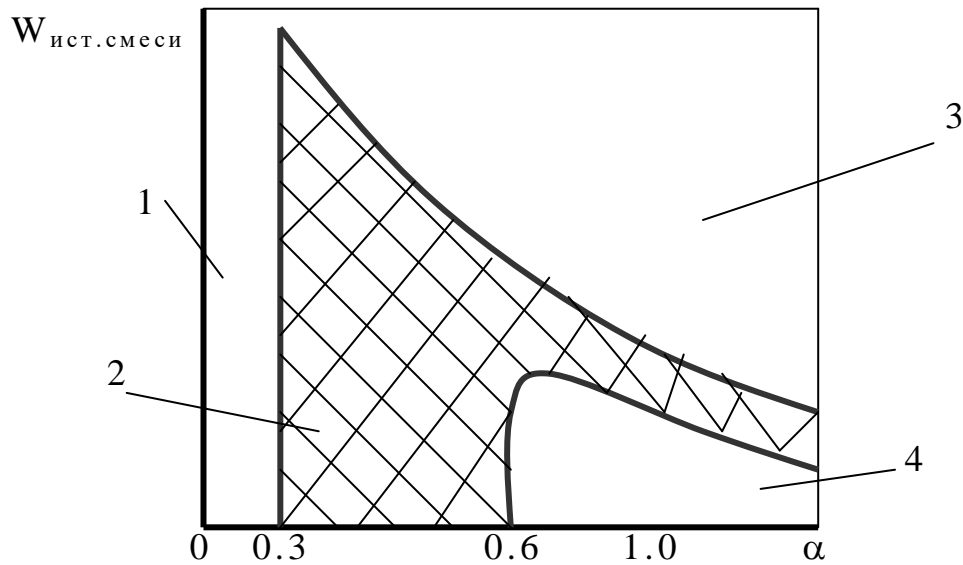
Рисунок 1.6 - Горелка с частичным предварительным смешиванием

### Основные преимущества:

- простота конструкции;
- возможность работы на газе низкого давления;
- отсутствие принудительной подачи воздуха (подается инжекцией);
- короткое пламя;
- высокая устойчивость факела без применения стабилизаторов горения;
- бесшумность в работе;
- авторегулируемость  $\alpha_{пер}$ .



Диапазон устойчивой работы горелки приведен на рисунке 1.7.



1 – область желтых языков пламени; 2 – область устойчивого горения; 3 – область отрыва факела; 4 – область проскока пламени.

Рисунок 1.7 – Диапазон устойчивой работы горелки

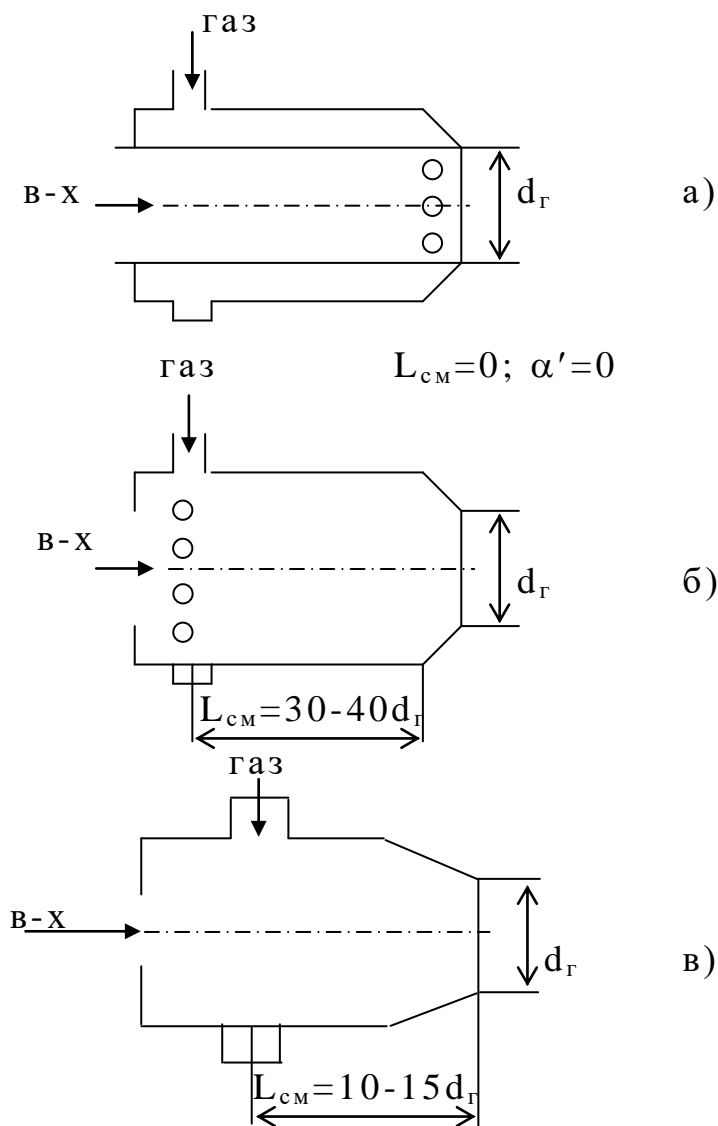
Горелки работают устойчиво с  $\alpha'=0.3-0.6$  – коэффициент первичного расхода воздуха. Самое опасное отрыв пламени – возможен взрыв.

### Недостатками горелок являются:

- низкая экономичность процесса горения;
- большая чувствительность к разряжению в топке;
- неустойчивость факела при принудительной подаче воздуха;
- громоздкость горелки из-за многофакельности.

Эти горелки применяются в сушилках, в мелких водогрейных котлах, в низкотемпературных промышленных печах.

**Горелки незавершенного предварительного смешивания** могут быть похожими на кинетические и диффузионные. Это основной класс горелок т.к. 80% газа сжигается этим типом горелок. Эти горелки могут быть большой мощности  $V=10000 \text{ м}^3/\text{ч}$ . и более (рисунок 1.8).



а – диффузионные горелки; б – кинетические горелки; в – горелка с незавершенным предварительным смешиванием.

Рисунок 1.8 – Схемы горелок

Изучая конструкции ГГУ как правило не каждый может ответить на вопрос какой факел имеет эта горелка. В связи

с этим приведем признаки, по которым судят о факеле горелки.

#### **Признаки короткопламенных горелок:**

- закрутка газа и воздуха;
- подача газа системой мелких струй поперек потока воздуха;
- наличие достаточно длинного смесителя.

Если у горелки есть два из этих признаков, то эта горелка короткофакельная (короткопламенная).

#### **Признаки длиннопламенных горелок:**

- отсутствие закрутки газа или воздуха;
- подача газа одной или несколькими струями параллельно потоку воздуха;
- короткий смеситель.

В случае наличия в конструкции горелки двух признаков, горелка считается длиннопламенной.

**Горелки с регулируемой длиной и светимостью факела** (диффузионные, кинетические и др.).

Многие технологические процессы требуют регулируемой длины факела (мартеновская печь). В новых теплотехнических агрегатах необходимо ставить горелки с регулируемой длиной факела. При сжигании некоторых видов топлива возникает необходимость управлять длиной и светимостью факела. Рассмотрим приемы управления длиной и светимостью факела:

- двухступенчатый подвод газа;
- двухступенчатый подвод воздуха;
- переменная закрутка газа и воздуха;
- изменение длины смесителя;

- изменение угла встречи потока газа и воздуха.

### **Горелки с принудительной подачей воздуха.**

Характерной особенностью этого типа горелок является то, что воздух подается от вентилятора, а не из окружающей среды (рисунок 1.9).

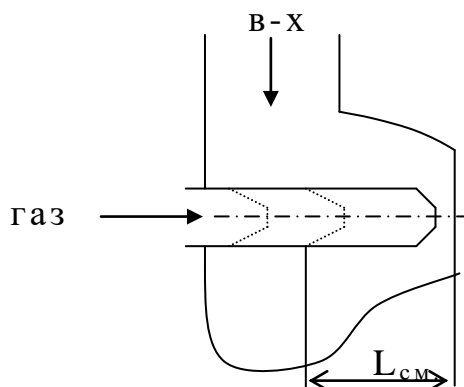


Рисунок 1.9 – Схема горелки с принудительной подачей воздуха

Для этого типа горелок характерны следующие преимущества:

- простота конструкции; широкий диапазон регулирования газ-воздух;
- малый шум и малые габариты;
- возможность работы на газе любого давления, применение высоко подогретого воздуха;
- возможность регулирования длины факела.

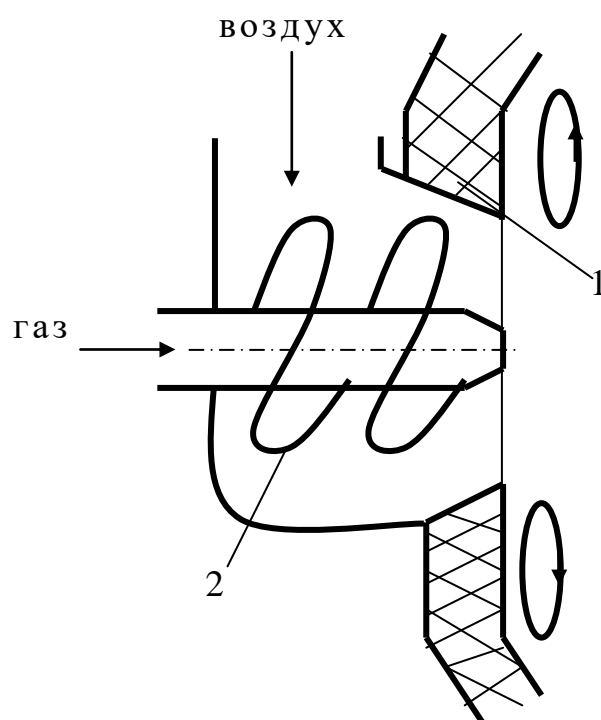
**Газотурбинные горелки.** Это горелки среднего и высокого давления, в которых энергия газа используется для вращения турбинного колеса и связанного с ним осевого вентилятора. Они бывают: турбоактивные и турбореактивные.

**Недостатками этого типа горелок являются:**

- сложность изготовления;
- шум;
- наличие вращающихся частей.

**К достоинствам** следует отнести отсутствие затрат на электроэнергию.

**Плоско-пламенные горелки (ППГ).** Это горелки, которые создают разомкнутый диффузионный факел большого диаметра в сечении перпендикулярном к оси и который выгорает в тонком слое у поверхности огнеупорной кладки. Схема горелки представлена на рисунке 1.10.



1 – кладка камеры; 2 – винтовые лопасти.

Рисунок 1.10 – Схема плоскопламенной горелки

Тепло от факела к огнеупорной кладке передается конвекцией, а от кладки к нагреваемому материалу излучением. Рециркуляция продуктов горения является источником зажигания и стабилизации процесса горения.

К достоинству этого класса горелок относится – создание равномерного поля температур на значительных площадях. Применяют в основном для скоростного и равномерного нагрева обрабатываемого материала.

К недостаткам следует отнести необходимость очистки газа и большое сопротивление по воздушному тракту. Так, давление воздуха в них должно быть не менее 4 кПа.

**Комбинированные горелки** используются тогда, когда необходимо использование нескольких видов топлива (газозащитное, газопылеугольное и др.).

Комбинированные горелки применяют в агрегатах, не допускающих перерывов в работе, а также у буферных потребителей. Их применяют тогда, когда необходимо получить светящийся факел, т.е. тогда, когда при сжигании газа получаем не светящийся факел (газозащитные горелки).

Стабилизация горения (факела) заключается в обеспечении устойчивой работы горелки без проскока и отрыва. Основными мерами предотвращения проскоков пламени в горелку являются:

- подбор выходных сечений, обеспечивающих  $W_{см} \geq U_{п}$ .
- постоянный отвод тепла от горелочного насадка с целью понижения температуры нагрева смеси (охлаждение горелочного насадка водой).

## **1.5 Расчет газогорелочных устройств**

### **1.5.1 Выбор числа и производительности горелок**

$Q_{max}$ ,  $Q_{min}$  – максимальная и минимальная тепловая мощность печи. Тогда максимальный расход топлива:

$$B_{\max} = \frac{k \cdot Q_{\max}}{N_{\max} \cdot Q_H^p}, \text{ м}^3/\text{с}$$

где  $N_{\max}$  – число горелок при максимальной нагрузке;

$k$  – коэффициент увеличения производительности (запаса) т.к. газ неравномерно распределяется между параллельно работающими горелками ( $k=1.1 \dots 1.2$ ).

Минимальный расход топлива:

$$B_{\min} = \frac{Q_{\min}}{k \cdot N_{\min} \cdot Q_H^p}, \text{ м}^3/\text{с}$$

Тогда диапазон в котором горелка будет работать устойчиво определяем:

$$n = \frac{B_{\max}}{B_{\min}}$$

Чем больше количество горелок, тем они будут компактнее, но возрастет число коммуникаций, что повышает капитальные затраты. Кроме того, создается трудность автоматизации при большом количестве горелок. Однако наличие большого количества горелок позволяет:

- легко регулировать производительность печи;
- обеспечить более равномерный нагрев изделий.

Единых правил по выбору количества горелок нет. Так, для котлов производительностью  $D=75 - 3600$  т. пара/ч количество их колеблется от 2 до 64 горелок для пылеугольного топлива.

### 1.5.2 Выбор коэффициента расхода воздуха

Исследователями установлено, что при сжигании газа с  $\alpha=1$  в продуктах горения содержится  $O_2^{\text{ост}}=0.3 - 0.4\%$ , может быть  $CO$ ,  $H_2$ , а при  $\alpha<1(0.9)$  также имеется  $O_2^{\text{ост}}$  от 0.3

до 0.4 % и горючие компоненты CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>. Таким образом полное сжигание топлива можно осуществить при  $\alpha \geq 1.02$ . В связи с колебаниями расхода воздуха горелки проектируют с коэффициентом расхода,  $\alpha$ :

- кинетические горелки  $\alpha = 1.02 - 1.05$ ;
- диффузионные с предварительным смешиванием  $\alpha = 1.05 - 1.1$ ;
- диффузионные горелки “труба в трубе” (плохое смешивание)  $\alpha = 1.2 - 1.3$ .

Все значения коэффициента расхода воздуха ( $\alpha$ ) приведены для организованного воздуха, т.е. присосы в горении не должны участвовать. На рисунке 1.11 представлена схема присосов топки котла.

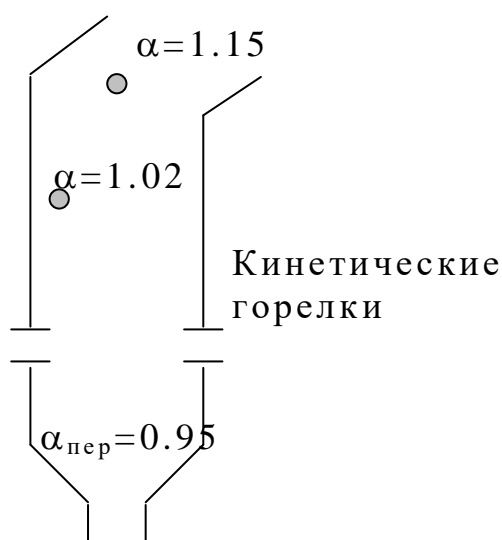


Рисунок 1.11 – Схема присосов топки котла

### 1.5.3 Расчет истечения газа (воздуха) из отверстий (сопел)

Наиболее ответственной частью горелок являются сопла и выходные отверстия. Обычно исходными данными для



расчета являются: расход газа и воздуха,  $V_{\text{г}}$ ,  $V_{\text{в}}$ ,  $\text{м}^3/\text{ч}$ ,  $\text{м}^3/\text{с}$ , давление газа и воздуха перед горелкой (соплом)  $P_{\text{г}}$ ,  $P_{\text{в}}$ , Па, плотность газа и воздуха  $\rho_{\text{г}}$ ,  $\rho_{\text{в}}$  ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ).

Расчет сопел производят на номинальное давление газа, которое представляет разность между давлением газа на входе в теплотехническую установку и суммой потерь давления до самой удаленной точки (горелки) в цехе. Схема для расчета приведена на рисунке 1.12.

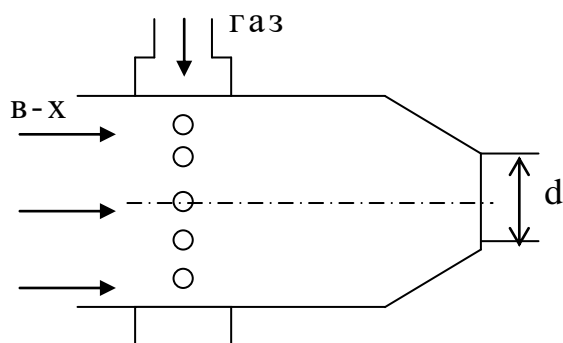


Рисунок 1.12 – Схема для расчета ГГУ.

$W=?$  - скорость,  $V=?$  - расход газа,  $F=?$  - площадь сечения

Связь между расходом, площадью и скоростью истечения следующая

$$V = W \cdot F; \quad F = \frac{V}{W} = \frac{\pi d^2}{4}; \quad d = \sqrt{\frac{4F}{\pi}}; \quad W = \frac{V}{F}$$

где  $F$  – площадь сечения сопла горелки,  $\text{м}^2$ ;

$V$  – расход газа  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$W$  – скорость истечения газа,  $\text{м}/\text{с}$ .

При истечении газа из сопла (отверстия) потенциальная

энергия переходит в кинетическую, т.е.  $\Delta P = \frac{W^2 \cdot \rho}{2}$ , тогда:

$$W = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \text{ - уравнение несжимаемой жидкости.}$$

где  $\Delta P$  – перепад давления в горелке, Па;

$\rho$  - плотность газа при рабочих условиях,  $\text{кг}/\text{м}^3$

Возможны следующие варианты: **при  $P_r \leq 10000$  Па.**

Скорость истечения несжимаемой реальной жидкости:

$$W = \varphi \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}$$

где  $\varphi$  - коэффициент учитывающий потери механической энергии в тепловую (коэффициент скорости).

Тогда расход равен:

$$V = F W$$

В процессе истечения струи из отверстия она сужается, что учитывается коэффициентом сжатия струи,  $\varepsilon$ , который определяется (рисунок 1.13):

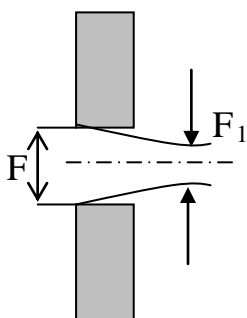


Рисунок 1.13 – Схема истечения струи из отверстий

Тогда расход газа определяется по выражению:

$$V = F \cdot \varepsilon \cdot W$$

где  $\varepsilon$  - коэффициент живого сечения (коэффициент сжатия струи при истечении из отверстия), равен  $F_1/F$

Подставим значение скорости получим расход газа:

$$V = \varepsilon \cdot \varphi \cdot F \cdot \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}, \text{ м}^3/\text{с}.$$

В свою очередь коэффициент расхода равен  $\mu = \varepsilon \cdot \varphi$ . С учетом этого расход равен:

$$V = \mu \cdot F \cdot \sqrt{2\Delta P / \rho}$$

Массовый расход:

$$G = V \cdot \rho, \text{ кг/с}$$

Плотность при рабочих условиях:

$$\rho = \rho_0 \cdot \frac{273}{T} \cdot \frac{P}{P_0 = 101325 \text{ Па}}$$

При  $P_r > 10000 \text{ Па}$ , при этом применяют для расчета скорости формулы истечения сжимаемой жидкости (формулы адиабатического истечения):

$$W = \varphi \cdot \sqrt{\frac{2k}{k-1} \cdot \frac{P_a}{\rho} \left( 1 - \left( \frac{P_0}{P_a} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right)}$$

где  $k$  – показатель адиабаты ( $C_p/C_v$ );

$P_a$  – абсолютное давление газа, Па;

$P_a = P_0 + P_1$ , где  $P_1$  – избыточное давление газа;

$P_0$  – давление среды или давление на выходе из сопла, Па;

$\rho$  – плотность газа при рабочих условиях,  $\text{кг/м}^3$ .

В.П. Михеев предложил пользоваться формулами для истечения несжимаемой жидкости при давлениях  $P_r (10-70) \times 10^3 \text{ Па}$ , если вместо рабочей плотности  $\rho$  подставить ставить  $\bar{\rho}$  – средняя плотность газа. Как же найти  $\bar{\rho}$ ?

Имеем: перед соплом  $P_1, T_1, \rho_1$

за соплом  $P_2, T_2, \rho_2$ .

$$\text{тогда } \rho_1 = \rho_0 \cdot \frac{273}{T_1} \cdot \frac{P_1}{P_0}; \quad \rho_2 = \rho_0 \cdot \frac{273}{T_2} \cdot \frac{P_2}{P_0}.$$

Как же определить  $T_2$ . Для этого воспользуемся формулой адиабатического истечения:

$$T_2 = T_1 \cdot \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}}$$

Приведем показатель адиабаты для следующих газов:

воздух	$k=1.4$ ;
пропан бутановая смесь	$k=1.12$ ;
природный и сжиженные газы	$k=1.31$ ;
коксовый газ	$k=1.38$ ;
доменный газ	$k=1.4$ .

Тогда средняя плотность газа будет равна:

$$\bar{\rho} = \frac{\rho_1 + \rho_2}{2} = \frac{273 \cdot \rho_0^r}{2P_0} \cdot \left( \frac{P_1}{T_1} + \frac{P_2}{T_2} \right);$$

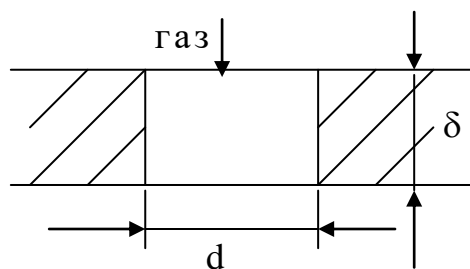
где:  $P_0 = 101325$  Па;

$P_1 = P_0 + P_{(1)изб}$ , Па;

$P_2 = P_0 + P_{(2)изб}$ , Па.

Теперь запишем значения коэффициентов  $\varphi$ ,  $\varepsilon$ ,  $\mu$  для следующих условий:

1. Для отверстий в толстой стенке с острыми кромками (рисунок 1.14):

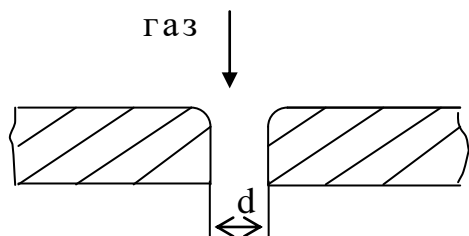


$$\delta = (1-3d)$$

$$\varphi = 0,82, \varepsilon = 1.0, \mu = 0.82.$$

Рисунок 1.14 – Схема отверстия в толстой стенке

2. Для отверстий в толстой стенке с закругленными кромками (рисунок 1.15).



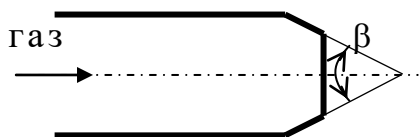
$$\varphi=0,96-0,99, \quad \varepsilon=1, \\ \mu=0,96-0,99.$$

Рисунок 1.15 – Схема отверстия с закругленными кромками

3. Для отверстий в тонкой стенке  $d > \delta$

$$\varphi=0,97-0,98, \quad \varepsilon=0,62-0,64, \quad \mu=0,6-0,62.$$

4. Суживающиеся сопла с углом  $\beta$  от  $13^\circ$  до  $30^\circ$ .



	$13^\circ$	$30^\circ$
$\varphi=0,96$		$0,97;$
$\varepsilon=0,98$		$0,92;$
$\mu=0,94$		$0,9.$

## 1.6 Расчет прямооточных дутьевых горелок (кинетические, диффузионные с незавершенным предварительным смешиванием)

Необходимо отметить, что методика расчета всех этих горелок одинаковая. При этом в зависимости от исходных данных возможно два варианта:

**1 вариант.** Задан состав газа и его параметры:  $P_{г}^{изб}$ ,  $t_{г}$ ,  $t_{в}$ ,  $P_{в}$ , производительность горелки или расход газа через нее ( $Q_p$ , кВт или  $V_{г}^0$ ,  $нм^3/ч$ ).

Определить геометрические размеры и пределы регулирования.

**2 вариант.** Заданы те же параметры, кроме давления воздуха  $P_v$  и дополнительно заданы пределы регулирования от 20 до 100%.

Определить геометрические размеры горелки и давление воздуха.

### 1.6.1 Первый вариант расчета дутьевых горелок

Расчет расходов газа, воздуха, газозвушной смеси, их плотностей и температуры смеси.

Расход газа равен:

$$V_0^{\Gamma} = \frac{Q_{\text{ном}}(\text{кВт})}{Q_{\text{н}}^{\text{р}}(\text{кДж/нм}^3)}, \text{ м}^3/\text{с}$$

Определяем расход воздуха по следующему выражению:

$$V_g = \alpha \cdot V_g^0 \cdot V_0^{\Gamma}, \text{ м}^3/\text{с}.$$

Плотность  $\rho_0^{\Gamma}$  – определяем по составу газа; плотность реальную т.е. при рабочих условиях:

$$\rho_{\Gamma} = \rho_{\Gamma}^0 \cdot \frac{273}{273 + t_{\Gamma}}, \text{ кг/м}^3$$

Аналогично для воздуха:

$$\rho_v = \rho_v^0 \cdot \frac{273}{273 + t_v}, \text{ кг/м}^3$$

Для того чтобы определить плотность смеси  $\rho_{\text{см}}$  нужно знать температуру смеси, которую определяем по следующему выражению :

$$I_g + I_z = I_{\text{см}}$$

где  $I_v, I_{\Gamma}, I_{\text{см}}$  – соответственно энтальпии воздуха, газа и смеси.

$$V_g^0(C \cdot t)_g + V_z^0(C \cdot t)_z = (V_g \cdot C_g^{t_{см}} + V_z \cdot C_z^{t_{см}}) \cdot t_{см}$$

Методом последовательных приближений определяем  $t_{см}$  и затем находим реальные расходы воздуха и газа.

$$V_g = V_g^0 \cdot \frac{273 + t_g}{273}; \quad V_z = V_z^0 \cdot \frac{273 + t_z}{273}; \quad V_{см} = \frac{V_g^0 + V_z^0}{273} \cdot (273 + t_{см})$$

Расход газа, кг/с:  $G_{г} = V_{г}^0 \rho_{г}^0;$

Расход воздуха, кг/с:  $G_{в} = V_{в}^0 \rho_{в}^0.$

Тогда плотность смеси:

$$\rho_{см} = \frac{G_{в} + G_{г}}{V_{см}}, \text{ кг/м}^3$$

Расчет проточной части горелки (или воздушного канала) при известном  $P_{в}$ .

Выбор коллектора или подвода воздуха производится по экономически целесообразной массовой скорости:

$$\rho W = 20-24 \text{ кг/м}^2 \text{ с.}$$

тогда  $W_{в} = (\rho W) / \rho_{в}$ , затем по  $W_{в}$  и  $V_{в}$  находим  $F = V_{в} / W_{в} \rightarrow D_{в}$ .

Как же определить кратер горелки ( $D_{кр}$ )? Для этого учитываем то, что мы всегда заинтересованы в получении высокой скорости смеси и знаем  $P_{в.пол}^{изб}$ , которое определяется по следующему выражению:

$$P_{в.пол}^{изб} = P_{в.стат} + \frac{W_{г}^2 \cdot \rho_{г}}{2} = \frac{W_{см}^2 \cdot \rho_{см}}{2} + \sum \Delta P_{потерь} \pm P_{камеры.сгор.} \quad (1)$$

Определим каждую из этих величин:

$$P_{изб.топ.котла} = 30-35 \text{ Па}; \quad \sum \Delta P_{потерь} = \Delta P_{тр} + \Delta P_{газ.струи} + \Delta P_{конф.}$$

$\Delta P_{тр} = 10-15 \text{ Па}$  т.к.  $W_{в.гор} = 10-15 \text{ м/с}$ ,  $\Delta P_{г.стр} = 0$  – сопротивление вводу газовой струи в воздушный поток. Тогда:

$$\Delta P_{конфузора} = \zeta_{кон} \cdot \frac{W_{см}^2 \cdot \rho_{см}}{2}$$

где  $\zeta_{\text{кон}} = 0.5 \cdot \sin \frac{\beta}{2} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{D_{\text{кр}}}{D_{\text{в}}} \right)^2 \right]$  - коэффициент местного

сопротивления,  $\zeta_{\text{кон}}$  - потери в конфузоре, Па,  $\beta$  - центральный угол конфузора,  $D_{\text{кр}}/D_{\text{в}}=0.7-0.8$ .

$$P_{\text{в}}^{\text{расч}} = 0.9 - 0.95 P_{\text{в}} = (1 + \zeta_{\text{кон}}) \cdot \frac{W_{\text{см}}^2 \cdot \rho_{\text{см}}}{2} \rightarrow W_{\text{см}} \rightarrow \frac{V_{\text{см}}}{W_{\text{см}}} \rightarrow f_z \rightarrow d_k$$

Примечание: в расчете надо вводить вместо  $P_{\text{в.пол}}^{\text{изб}}$ .  $P_{\text{в.пол}}^{\text{распол}} = 0.9 - 0.95 P_{\text{пол.расч}}$ . Этим мы сможем скомпенсировать неучтенные потери. По формуле Иссерлина определяем скорость при которой возможен проскок пламени в горелку:

$$W_{\text{кр}} = 0.00775 \cdot U_n^2 \cdot \frac{D_{\text{кр}}}{a_{\text{см}}}, \text{ м/с}$$

где  $U_n^2$  - нормальная скорость распространения фронта пламени, м/с,  $a_{\text{см}}$  - коэффициент температуропроводности. Принимаем " $a_{\text{см}}$ " для газозвушной смеси как для воздуха.

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c}, \text{ м}^2/\text{с}$$

где  $\rho$ -плотность газа, кг/м<sup>3</sup>,  $c$ -теплоемкость газа, кДж/кг·К,

$\lambda$  - коэффициент температуропроводности, Вт/м·К.

Можно работать при условии:  $W_{\text{min.см}} = W_{\text{кр}}$ .

Однако, рекомендуется в расчете для стабильности процесса горения  $W_{\text{min.см}} = 1.15 - 1.20 W_{\text{кр}}$ .

После нахождения  $W_{\text{min}}$ , определяем нижний предел регулирования горелки.

$$\frac{W_{\text{min.см}}}{W_{\text{см.ном}}} \cdot 100, \%$$



Нормальная скорость распространения фронта пламени определяется:

$$U_n = \frac{(z_1 \cdot U_{n1} + z_2 \cdot U_{n2} + \dots + z_n \cdot U_i) \cdot \left( \frac{100 - 1.2CO_2 - N_2}{100} \right)}{z_1 + z_2 + \dots + z_n}$$

где  $z_1, z_2, z_3, z_n$  - % состав чистых горючих газов;

$U_{n1}, U_{n2}, U_i$  - скорость распространения фронта пламени для чистых газов умноженная на поправку балласта  $\left( \frac{100 - 1.2CO_2 - N_2}{100} \right)$

где

$CO_2$  - содержание в газе углекислого газа, об. %;

$N_2$  - содержание азота, об. %.

Эта поправка применяется в случае сжигания газов, имеющих значительный балласт (доменный, генераторный и др.).

Формулы для определения отрыва и проскока пламени в горелку в зависимости от условий :

- при холодном воздухе

$$W_{i\delta\delta} = 0,575 \cdot 10^2 \cdot \alpha^{-2} \cdot U_n^{1.5} \cdot \left( \frac{D_{\bar{A}}}{a} \right)^{0.5}$$

$$W_{i\delta} = 7,75 \cdot 10^{-3} \cdot \alpha^{-2} \cdot U_n^2 \cdot \left( \frac{D_{\bar{A}}}{a} \right);$$

- при подогреве воздуха от 20 – 400 °С :

$$W_{i\delta\delta} = 0,575 \cdot 10^2 \cdot \alpha^{-2} \cdot U_n^{1.5} \cdot \left( \frac{D_{\bar{A}}}{a} \right)^{0.5} \cdot \left( \frac{T}{T_0} \right)^{0.8}$$

$$W_{i\delta} = 7,75 \cdot 10^{-3} \cdot \alpha^{-2} \cdot U_n^2 \cdot \left( \frac{D_{\bar{A}}}{a} \right) \cdot \left( \frac{T}{T_0} \right)^{0.8};$$

- при обогащении воздуха кислородом (21 – 25 %  $O_2$ ) :

$$W_{i\delta} = 0,575 \cdot 10^2 \cdot \alpha^{-2} \cdot U_n^{1.5} \cdot \left(\frac{D_{\tilde{A}}}{a}\right)^{0.5} \cdot \left(\frac{X_{O_2}^i}{\tilde{O}_{i_2}^{21}}\right)^{2.25}$$

$$W_{i\delta} = 7,75 \cdot 10^{-3} \cdot \alpha^{-2} \cdot U_n^2 \cdot \left(\frac{D_{\tilde{A}}}{a}\right) \cdot \left(\frac{\tilde{O}_{i_2}^i}{\tilde{O}_{i_2}^{21}}\right)^{2.25};$$

где  $D_{кр} = D_{г} = D_{вых}$  – собственно диаметр кратера, горелки, сопла.

$T$  - температура подогрева воздуха, К;

$T_o$  - температура холодного воздуха, К;

$X_{O_2}^i$  - концентрация кислорода в обогащенном дутье, % ;

$X_{O_2}^{21}$  - концентрация кислорода в обогащенном атмосферном воздухе, % ;

### 1.6.2 Второй вариант расчета дутьевых горелок

Диаметр выходного канала определяется по первому варианту. Минимальную скорость смеси определяем:

$$W_{см. min} = \frac{V_{см. min}}{0.785 \cdot D_{кр}^2 \cdot \varepsilon} \quad (2)$$

Минимальный расход смеси при 20% нагрузке равен:

$$V_{см. min} = 0.2 \cdot V_{см. ном}$$

минимальная скорость при которой возможен проскок пламени в горелку:

$$W_{см. min} = k_{зан} \cdot W_{кр} = k_{зан} \cdot 0.00775 \cdot U_n^2 \cdot \frac{D_{кр}}{a_{см}} \quad (3)$$

Приравнивая уравнения (2) и (3) получаем:

$$D_{кр} = \sqrt[3]{\frac{V_{см. min} \cdot a_{см}}{k_{зан} \cdot 0.00775 \cdot U_n^2 \cdot \varepsilon \cdot 0.785}} = 5.5 \cdot \sqrt[3]{\frac{V_{см. min} \cdot a_{см}}{k_{зан} \cdot U_n^2 \cdot \varepsilon}}$$

Это условие работы на 20% производительности.

Теперь определим полное давление воздуха  $P_{в.пол}$ , но

сначала определим номинальную скорость смеси:

$$W_{см.ном} = \frac{V_{см.ном}}{0.785 \cdot D_{кр}^2 \cdot \varepsilon}$$

Тогда давление воздуха равно:

$$P_{в.пол} = (1 + \zeta) \cdot \frac{W_{см.ном}^2}{2} \cdot \rho_{см} + \Delta P_{г.с} \pm P_{кам.сгор}$$

Для более полного учета потерь необходимо:

$$P_{в.пол.расч} = (1.05 - 1.1) P_{в.пол}$$

### 1.6.3 Расчет газовыпускных отверстий

Для улучшения процесса смешения газа с воздухом необходимо газ вводить несколькими струями, путем выбора оптимального количества отверстий для входа газа и обеспечить оптимальную глубину проникновения его в сносящий воздушный поток

Рассмотрим характер истечения струи газа из отверстия (рисунок 1.16).

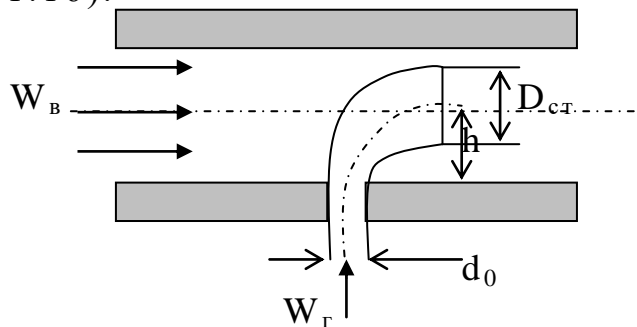


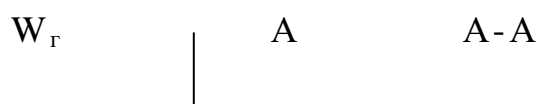
Рисунок 1.16 - Схема газовой струи в сносящем потоке воздуха

$D_{ст} = 0.75h$  – формула Чернобыльского.

где  $D_{ст}$  – диаметр струи,  $h$  – глубина проникновения струи газа в сносящий воздушный поток;

В зависимости от скорости истечения газа возможны следующие случаи:

- малая скорость истечения газа (рисунок 1.17).



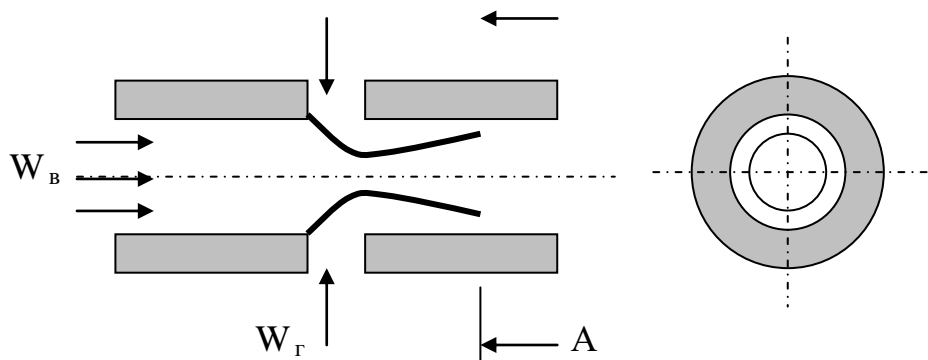


Рисунок 1.17 – Схема газовой струи при малой скорости истечения газа

- слишком большая скорость истечения газа (рисунок 1.18).

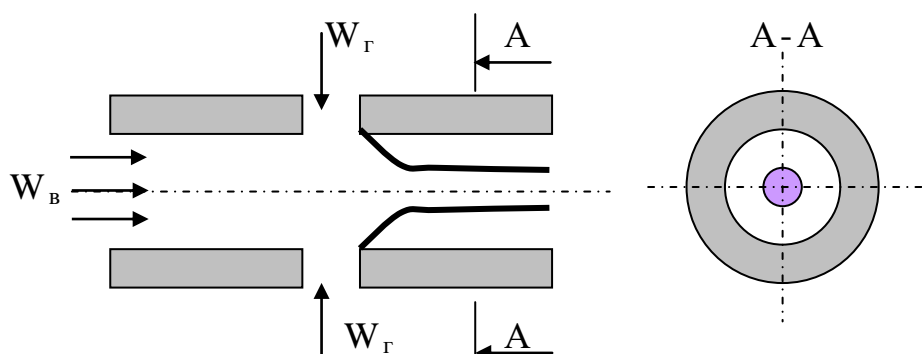


Рисунок 1.18 – Схема газовой струи при слишком большой скорости газа

- промежуточная скорость газа (рисунок 1.19).

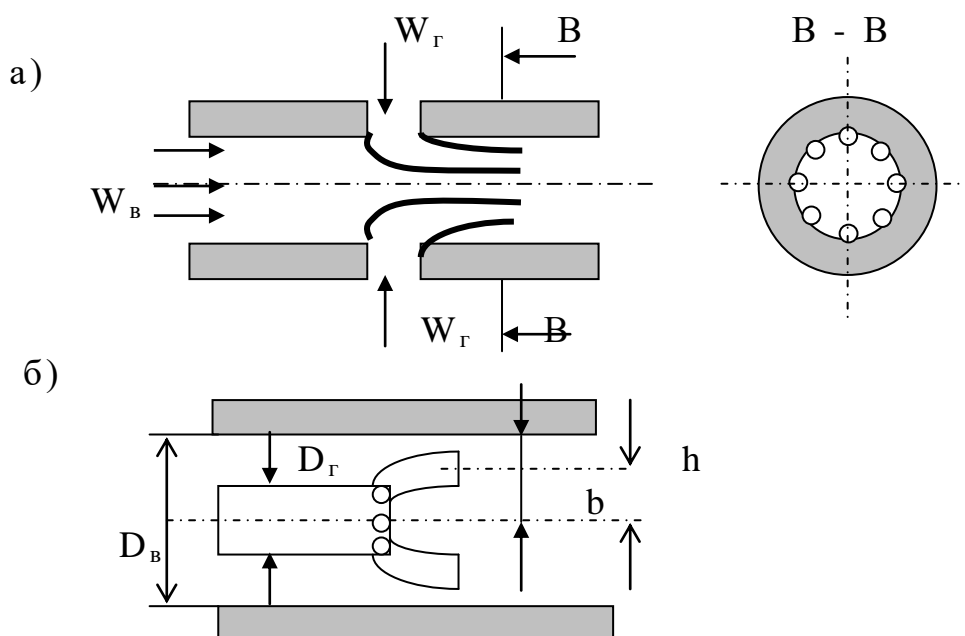


Рисунок 1.19 – Схема истечения газовой струи при промежуточной скорости газа (а – при периферийной подаче газа; б – при центральной подаче газа)

Значения глубины проникновения газовых струй в зависимости от подачи газа в сносящий воздушный поток определяется по следующему выражению:

$$h=(0.2-0.25)D_{\text{в}} \text{ – периферийная подача газа;}$$

$$h=b/2=0.25(D_{\text{в}}-D_{\text{г}}) \text{ – центральная подача газа.}$$

Анализ влияния скорости газа на глубину проникновения струи в воздушный поток показал, что малая и большая скорость газа дают плохое смесеобразование, что приводит к увеличению времени смесеобразования и удлинению факела.

Наиболее благоприятным является промежуточная скорость (малая-большая), которая позволяет проникнуть газовым струям в середину воздушного потока и значительно улучшить смесеобразование, что приводит к уменьшению длины смесителя и длины факела.

Кроме оптимальной глубины проникновения необходимо выбрать оптимальное число отверстий, т.к. от этого зависит качество смесеобразования. При этом возможны следующие варианты: слишком много газовых отверстий, малое количество отверстий и оптимальное количество отверстий (рисунок 1.20).

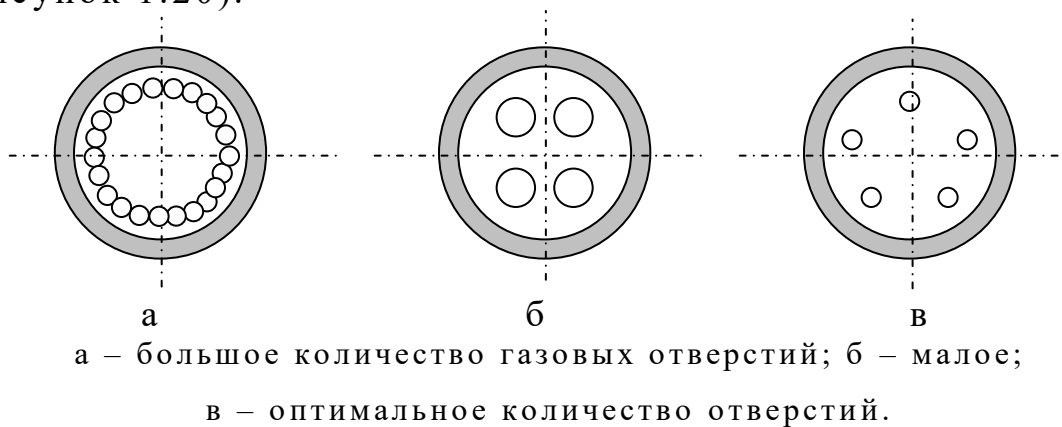


Рисунок 1.20 – Распределение газа в воздушном потоке в зависимости от количества отверстий

Из рисунка 1.20 следует, что при большом количестве отверстий, поток газа сливается в единое кольцо, при малом – две три струи, которые также не приводят к улучшению смесеобразования и длина смесителя при этом увеличивается. Оптимальное количество струй будет при условии

$$1.1 \leq \frac{t}{D_{стр}} < 2.5.$$

где  $t$  – шаг между струями газа, который равен:

$$t = \frac{\bar{\Pi}(D_s - 2h)}{n}$$

где  $n$  – число отверстий и для каждого “ $n$ ” свой шаг.

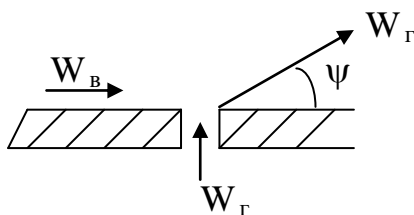
При  $\frac{t}{D_{стр}} > 2.5$  - имеем малое число струй,  $\frac{t}{D_{стр}} < 1.1$  - большое количество струй и они сливаются между собой.

#### 1.6.4 Расчет глубины проникновения струи газа в воздушный поток

Ю.В. Иванов предложил глубину проникновения газовых струй в сносящий воздушный поток определять по следующей формуле:

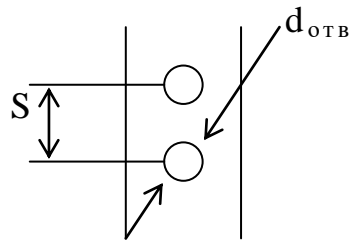
$$\frac{h}{d} = \frac{k_\psi \cdot k_s}{\eta \cdot \sqrt{\mu}} \cdot \frac{W_\Gamma}{W_B} \cdot \sqrt{\frac{\rho_\Gamma}{\rho_B}} \quad (1)$$

где  $k_\psi$  – коэффициент, учитывающий влияние на глубину проникновения угла атаки газовой струи.



$$k_\psi = \sin \psi; \quad \psi = 90; \quad k_\psi = 1; \quad k_\psi \leq 1.$$

$K_s$  – коэффициент учитывающий влияние шага между отверстиями на величину глубины проникновения  $h$ .



Коэффициент “ $k_s$ ” определяется по следующим формулам в зависимости от подачи газа при:

$$\text{периферийной подачи газа: } k_s = 1.5 + 0.026 \frac{S}{d}$$

$$\text{центральной подачи газа: } k_s = 1.71 - \frac{n-1}{35}$$

где  $n$  – число отверстий в одном ряду.

$\eta$  – коэффициент учитывающий увеличение скорости сносящего потока из-за присадок газа:

$$\eta = \frac{G_g + G_2}{G_g} \geq 1$$

где  $G_b$ ,  $G_r$  – весовые расходы воздуха и газа, кг,

$\mu$  – коэффициент расхода для газовыпускных отверстий.

Из уравнения (1) следует, что варьируя скоростью газа можно получить несколько вариантов. Расчеты их сведены в таблицу 1.3. из которой следует, что первые два варианта, когда шаг между струями  $t/D_{стр} < 1,1$  неприемлем, т.к. струи газа сливаются в единое кольцо. При четвертом варианте будет иметь только лишь две газовые струи. Лучшим вариантом является третий, согласно соотношению:

$$1.1 < t/D_{стр} < 2.5$$

Таблица 1.3 - Варианты истечения газовых струй

$W_{\Gamma}$ , м/с	$d_n$ , мм	$n = \frac{V_2}{W_2 \cdot 0.785d^2 \cdot \varepsilon}$	$\frac{t}{D_{ср}} = \frac{\pi(D_г - 2h)}{n \cdot 0.75h}$
$W_{\Gamma} = W_{\Gamma.маx}$	0.9	100	0.5
$W_{\Gamma} = 0.8W_{\Gamma.маx}$	1.5	50	0.9
$W_{\Gamma} = 0.5W_{\Gamma.маx}$	3	12	1.5
$W_{\Gamma} = 0.3W_{\Gamma.маx}$	10	2.19	10

$k_s$  обычно задаем  $\cong 1.6$  т.е. задаем систему отверстий в тонкой или толстой стенке т.е. получаем значение  $\mu$ . Выбранный вариант уточняется в отношении  $\mu$  и  $k_s$ . Необходимое число газовыпускных отверстий:

$$n = \frac{V}{V_{\bar{a}}}$$

где  $V$  – расход газа через горелку,  $\text{м}^3/\text{с}$ ,

$V_{\Gamma}$  – расход газа через одно отверстие,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

Практика показала, что невозможно при подаче газа обеспечить равномерное распределение его по отверстиям в коллекторе горелки, что приводит к ухудшению ее работы. На рисунке 1.21 представлено распределение скоростей истечения газа в воздушном потоке в зависимости от расположения отверстий в коллекторе.

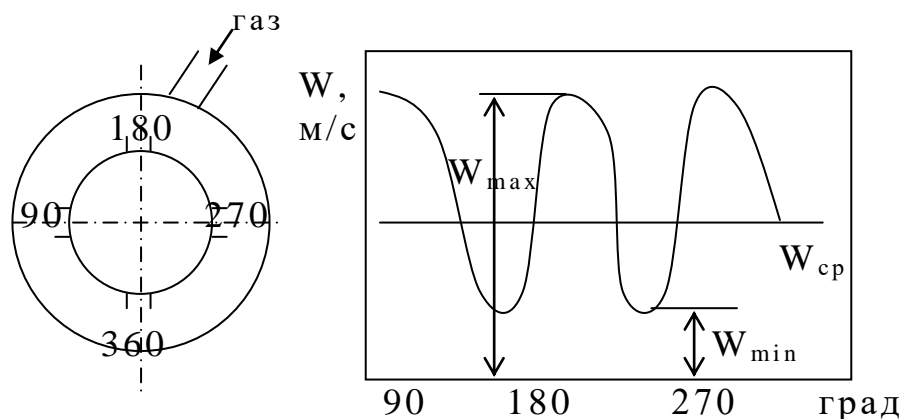


Рисунок 1.21 – Распределение скорости газа по газовыпускным отверстиям



Для учета вышесказанного, при проектировании дутьевых горелок с многоструйной подачей газа, вводят коэффициент неравномерности распределения газа по газовыпускным отверстиям  $\omega$ , который определяется:

$$\omega = \frac{W_{\max} - W_{\min}}{W_{cp}} \cdot 100, \%$$

Опытным путем Ахмедовым установлено, что неравномерность истечения газа не оказывает существенного влияния на смесеобразование при  $\omega \leq 10-12\%$ . Однако неравномерность распределения зависит от числа подводов газа в коллектор и от отношения суммарной площади газовыпускных отверстий,  $\Sigma f_{отв}$  к поперечному сечению газового коллектора  $F_{\Gamma}$ .

Для обеспечения  $\omega \leq 10-12\%$  параметр  $\Sigma f_{отв}/F_{\Gamma}$  не должен превышать 0.06-0.08 при одностороннем и 0.38-0.43 при двухстороннем подводах газа.

Кроме того, для более равномерного распределения газа подводы следует смещать по отношению к газовыпускным отверстиям. В связи с этим длину газового коллектора  $L_{\Gamma}$  следует принимать равной не менее 2-3 диаметров подводящего патрубка газа т.е.  $L_{\Gamma} = 2-3d_{газпр}$ .

При принятом  $L_{\Gamma}$  внутренний диаметр газового коллектора  $D_{\Gamma}$  определяем из выражения:

$$D_{\Gamma} = D_{в.нар} + 2F_{\Gamma}/L_{\Gamma}$$

где  $D_{в.нар}$  - наружный диаметр воздушного канала горелки, м;

$F_{\Gamma}$  - площадь газового коллектора,  $m^2$ .

Следует помнить, что для полного предварительного смешения газа с воздухом рекомендуется принимать (по

данным Иванова Ю.В) расстояние от газовыпускных отверстий до выходного сечения горелки (длину смесителя) равным 25 диаметрам газовыпускных отверстий. Для горелок с неполным предварительным смешиванием длину смесителя принимают в 2-3 раза меньше, т.е.  $L_{см}=10-12d_{г}^{отв}$ .

В диффузионных горелках смеситель отсутствует. Однако для эффективности сжигания газа необходимо применять многоструйную подачу газа, с учетом оптимального числа отверстий и оптимальной глубины проникновения струи газа в воздушный поток.

### 1.7 Расчет инжекционных горелок

Схема для расчета представлена на рисунке 1.22.

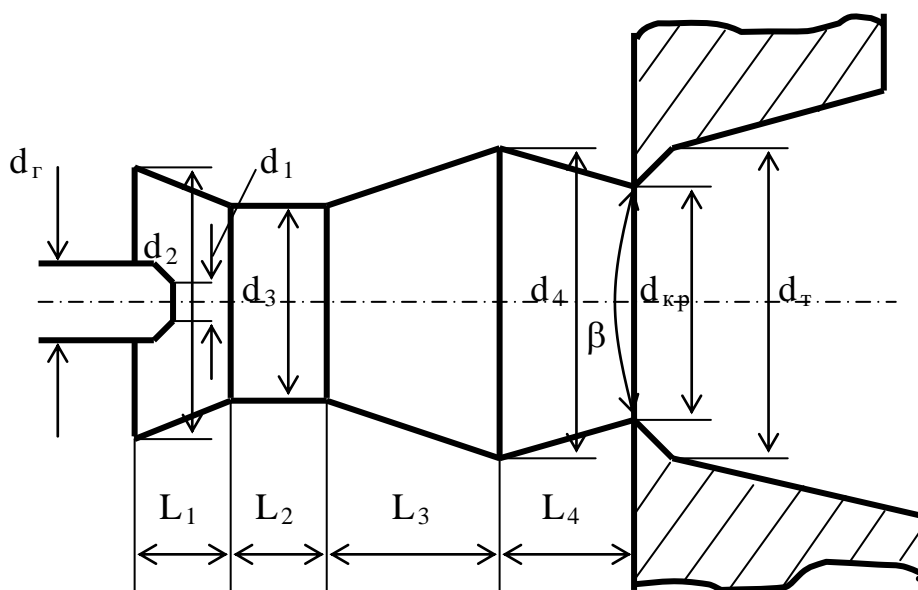


Рисунок 1.22 – Схема инжекционной горелки

Расчет горелок всегда ведут при рабочих условиях, т.е. делают поправку на давление и температуру.

Для инжекционных горелок кроме диаметра газового сопла ответственной частью является диаметр смесителя.

Сечение или диаметр смесительной камеры определяют по империческому уравнению инжекции:

$$\frac{F_{\text{см}}}{F_{\text{г}}} = \frac{d_{\text{см}}^2}{d_{\text{г}}^2} = (1+i) \cdot \left(1 + \frac{i \cdot \rho_{\text{в}}}{\rho_{\text{г}}}\right) \cdot \left(1 + \frac{\zeta}{2}\right)$$

где  $F_{\text{см}}$ ,  $d_{\text{см}}$  – площадь и диаметр смесителя, мм<sup>2</sup>, мм;

$F_{\text{г}}$ ,  $d_{\text{г}}$  – площадь сечения и диаметр газового сопла ( $d_{\text{г}} = d_1$ ), мм<sup>2</sup>, мм;

$\zeta$  – суммарный коэффициент сопротивления по тракту горелки. Обычно для инжекционных горелок  $\zeta=0.2$ ;

$i$  – объемный коэффициент инжекции, который показывает сколько метров кубических воздуха подсасывает 1 м<sup>3</sup> газа.

$$i = \frac{V_{\text{г}}}{V_{\text{з}}} = \alpha' \cdot L_0$$

где  $\alpha'$  – коэффициент первичного расхода воздуха.

Тогда диаметр смесителя определяется по следующему выражению:

$$d_{\text{см}} = d_3 = d_1 \sqrt{(i+1) \cdot \left(1 + i \frac{\rho_{\text{г}}}{\rho_{\text{з}}}\right) \cdot \left(1 + \frac{\zeta}{2}\right)}, \text{ мм}$$

Размеры остальных частей инжекционной горелки определяются по империческим зависимостям.

Диаметр входного сечения конфузора:

$$D_2 = (1.5-2.0)d_3, \text{ мм}$$

Диаметр выходного сечения диффузора:

$$d_4 = (2.0-2.2)d_3 \text{ – для горелок низкого давления (ГНД).}$$

$$d_4 = (1.5-1.7)d_3 \text{ – для горелок высокого давления (ГВД).}$$

Диаметр конфузора:  $L_1 = (1.5-2.0)d_3$ , мм

Длина горловины инжектора:

$L_2=(1.0-1.5)d_3$ , мм – для горелок НД.

$L_2=(3.5-4.0)d_3$ , мм – для горелок ВД.

Длина диффузора:

$$L_3 = \frac{d_4 - d_3}{2 \operatorname{tg} \frac{\beta}{2}}, \text{ мм.}$$

Диаметр кратера горелки:  $d_{кр}=(1.05-1.10)d_3$ , мм.

Длина конфузора:  $L_4=d_{кр}$ , мм.

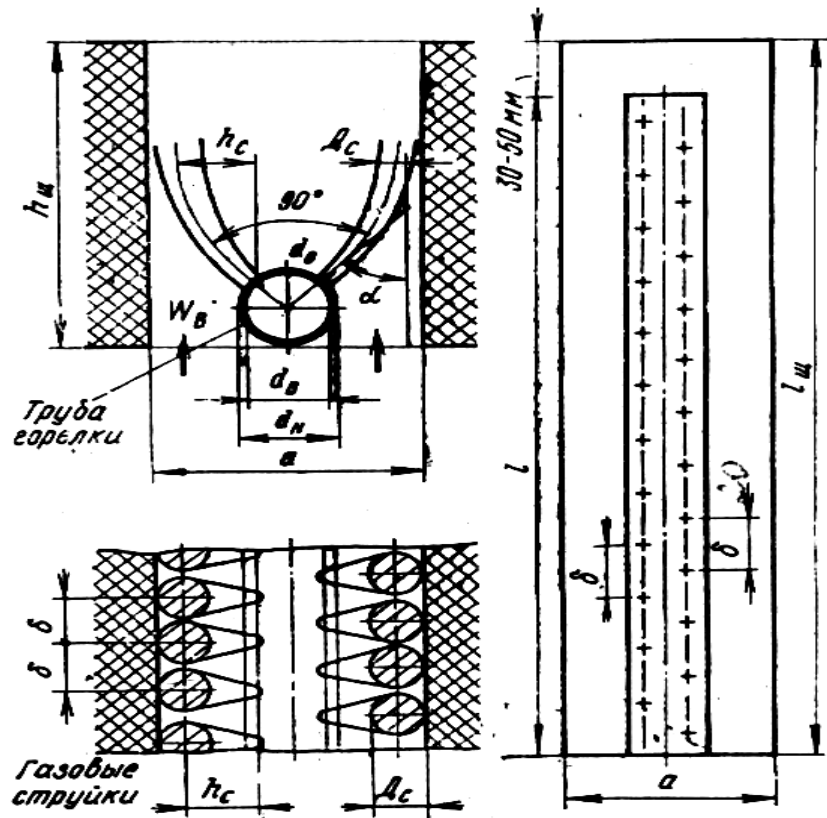
Диаметр огнеупорного тоннеля:  $d_T=(2.4-3.0)d_{кр}$ , мм.

Длина тоннеля:  $L_T=(2.4-2.7)d_T$ , мм.

### 1.8 Расчёт подовых горелок

Подовая горелка состоит из двух элементов: стальной бесшовной трубы (коллектора) с просверленными в ней отверстиями для выхода газа и огневой части (рис.1.23). Последняя представляет собой щель, выложенную из огнеупорного кирпича и располагаемую над трубой горелки. Расчетом определяют: размеры коллектора и огневой части; диаметр выходных отверстий, их количество и расположение на коллекторе; необходимое давление газа перед горелкой.

Число горелок принимают равным числу топочных дверок (обычно 1 - 3). Если горелки располагают в поперечном направлении относительно топки, в этом случае их выводят через боковую стенку котла. Диаметр коллектора составляет 40 - 200 мм при скорости движения газа до 20 м/с. Для обеспечения равномерной высоты пламени рекомендуется принимать поперечное сечение трубы в 1,5 - 2,5 раза больше суммарного сечения выходных отверстий.



$h_{щ}$  – высота щели;  $a$  – ширина щели;  $l_{щ}$  – длина щели

Рисунок 1.23 – Схема расположения газовых струек у подовых горелок

Ширину огнеупорной части горелки определяют по скорости движения воздуха в узком сечении щели. Скорость воздуха принимают 2,5 - 8 м/с. Меньшую величину выбирают для топок, работающих за счет тяги (без дутья); она должна соответствовать разрежению в топке. Минимальное разрежение для топок чугунных отопительных котлов составляет 8 Па. Для производственно-отопительных котлов разрежение в топке равно 20 - 30 Па.

Скорость воздуха в узком сечении щели  $W_B$  при работе топки без дутья рассчитывают по формуле:

$$W_B = \mu_B \sqrt{\frac{2\Delta\rho_T}{\rho_B}}, \quad (1.1)$$

где  $W_B$  — скорость воздуха в узком сечении;  $\Delta\rho_T$  — разре-

жение в топке;  $\rho_v$  — плотность воздуха при рабочих условиях;  $\mu_v$  — коэффициент расхода, который учитывает все гидравлические сопротивления на пути движения воздуха; его можно принимать  $\mu_v = 0,7$ .

Ширину щели определяют по уравнению:

$$a = \frac{\alpha \cdot V_0 \cdot Q_{гор}}{W_B \cdot l} \cdot \frac{T_B}{273} + d_H, \quad (1.2)$$

где  $a$  — ширина щели (между огнеупорными стенками);  $d_H$  - наружный диаметр коллектора;  $\alpha$  - коэффициент избытка воздуха;  $V_0$  - теоретическое количество воздуха, необходимого для горения,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ;  $T_B$  — температура воздуха, К;  $l$  — длина коллектора.

Для определения ширины щели предварительно следует задать длину коллектора, которую ориентировочно находят по тепловой нагрузке на 1 м горелки  $q_K$ , т. е.:

$$l = \frac{Q_{гор} \cdot Q_H^p}{N \cdot q_K}, \quad (1.3)$$

где  $N$  — число горелок для отопительных котлов;

$q_K$  — тепловое напряжение на зеркало горения. Так,  $q_K = 230 - 460$  кВт/м для котлов малой производительности с высотой топки до 3 м;  $q_K = 1150 - 1750$  кВт/м для котлов средней производительности с высотой топки более 3 м и для котлов большой производительности  $q_K = 2300 - 3500$  кВт/м.

Длину коллектора принимают на 100 - 600 мм меньше длины колосниковой решетки, а расстояние между горелками составляет 500 - 1200 мм. В соответствии с полученной шириной щели определяют глубину проникания струи  $h$  и диаметр отверстий  $d_0$ . Диаметр струи  $D_c$ , принявшей направление потока воздуха на расстоянии  $h$  от отверстий, определяют соотношением:

$$D_c = 0,75h,$$

где  $D_c$  - диаметр струи, мм;  $h$  — глубина ее проникания, мм.

Для повышения стабильности горения глубину проникания струи принимают немного больше ширины щели и определяют по следующему соотношению. Если глубину проникания принять равной ширине, она будет составлять:

$$h = \frac{1}{1,375} \cdot \frac{a - d_n}{2} = 0,73 \cdot \frac{a - d_n}{2}, \quad (1.4)$$

ее же принимают равной:

$$h = (0,85 - 0,9) \cdot \frac{a - d_n}{2} \approx 0,45 \cdot (a - d_n). \quad (1.5)$$

Диаметр отверстий для выхода газа рассчитывают по формуле (1.7). Отношение скоростей газа и воздуха рекомендуется принимать

$W_g/W_b = 10 - 15$ , что соответствует скоростям газа 30 - 80 м/с.

Большее отношение выбирают при работе котла без дутья.

Шаг между огневыми отверстиями  $\delta$  принимают равным:

$$\delta = 0,75h + (2 - 5) \text{ мм.}$$

Для чугунных котлов целесообразнее принимать диаметр отверстий 1,3-2 мм с шагом 13 - 20 мм, а для производственных котлов величина  $d_0 = 2 - 4$  мм, а  $\delta = 20 - 30$  мм. Отверстия располагают на трубе горелки в два ряда в шахматном порядке.

Длина коллектора составляет:

$$l = \frac{(n+1) \cdot \delta}{2}, \quad (1.6)$$

где  $n$  — число выходных отверстий, которое определяется по формуле:

$$n = \frac{\Pi(D_0 - 2 \cdot h)}{t}$$

$t$  — шаг между отверстиями, мм, который должен быть больше диаметра струи т.е.:

$$t > \frac{0,75 \cdot h}{\sin \beta}$$

Если принять среднее значение угла подъема  $\beta - 30^0$ , тогда  $t_{\min}=1,5h$ . Приняв определённое значение шага в долях глубины проникновения струи  $t = a \cdot h$ , можно определить число газовых струй;

$\Pi \cdot (D_0 - 2 \cdot h)$  - длина окружности, по которой располагаются центры газовых струй после поворота в воздушном потоке;

$h$  - глубина проникновения струи газа

$$\frac{h}{d} = k \cdot \frac{W_{\Gamma}}{W_B} \sqrt{\frac{\rho_{\Gamma}}{\rho_B}} \cdot \sin \alpha \quad (1.7)$$

где  $d$  - диаметр газовых отверстий, м;  $W_{\Gamma}$  - скорость истечения газа, м/с;  $W_B$  - скорость воздушного потока, м/с;  $\rho_{\Gamma}$ ,  $\rho_B$  - плотность газового и воздушного потока при рабочих условиях, кг/м<sup>3</sup>;  $\alpha$  - угол встречи (атаки) газового и воздушного потоков;  $k$  - опытный коэффициент, зависящий от относительного шага между газовыми отверстиями  $\left(\frac{\delta}{d}\right)$ . Так, при  $\frac{\delta}{d} = 4$   $k = 1,6$ ;  $\frac{\delta}{d} = 8$   $k = 1,7$ ;

$$\frac{\delta}{d} = 16 \quad k = 1,9; \quad \frac{\delta}{d} = \infty \quad k = 2,2.$$

Длину огневой щели, учитывая возможное тепловое расширение, принимают на 30 - 50 мм больше длины коллектора. Полученная длина коллектора  $l$  должна отличаться от предварительно принятой не более чем на 10%. В противном случае следует произвести пересчет.

Необходимое давление газа перед задвижкой горелки определяют по формуле:

$$\Delta p_{\text{ГАЗ}} = \left[ \frac{1}{\mu_0^2} + \sum \xi \cdot \left( \frac{F_0}{F_k} \right)^2 \right] \cdot \frac{W_{\Gamma}^2}{2} \cdot \rho_{\text{ГАЗ}}, \quad (1.8)$$



где  $\mu_0$  – коэффициент расхода отверстий горелки, равный 0,6- 0,7;

$\Sigma \xi$  – сумма коэффициентов гидравлических сопротивлений горелки (местных и линейных) от задвижки (включая последнюю) до выходных отверстий. Коэффициент  $\xi$  отнесён к динамическому давлению газа в коллекторе горелки;

$F_0$  – суммарная площадь выходных отверстий;

$\rho_{\text{газ}}$  – плотность газа.

Для чугунных отопительных котлов рекомендуется давление газа 800 – 1100 Па, а для производственных котлов – в пределах 5000 – 10000 Па.

### **1.8.1 Работа газовых горелок в нерасчетных условиях**

В практике проектирования и эксплуатации газовых горелок нередко приходится сталкиваться с необходимостью перерасчета их в связи с переходом на другой газ.

Работа горелок на другом газе с параметрами газа ( $Q_n^p$ ,  $P_g$ ,  $\rho_g$ ) отличающимися от расчетных, приводит к изменению их тепловой мощности и может привести к ухудшению качества сжигания. Колебания теплоты сгорания газа на 10% заметно влияет на показатели процесса горения. Наиболее часто в практике имеет место изменение давления газа, но бывают случаи, когда необходимо перевести тепловой агрегат на отопление с одного вида газа на другой. При этом для того, чтобы сохранить производительность горелки необходимо изменить ее выходное сечение или давление газа перед соплом. Работа газовых горелок любых типов не будет нарушена при равенстве чисел Воббе основного и заме-

няемого газа. Число Воббе – отношение теплоты сгорания газа ( $Q_{н}^P$ ) к корню квадратному из его плотности:

$$W_0 = \frac{Q_{н}^P}{\sqrt{\rho}}$$

**Возможны следующие варианты перерасчета:**

- изменение давления газа ( $Q_{н}^P$ ,  $\rho$ -const):

$$d' = d \sqrt{\frac{P}{P'}}, \text{ мм}$$

где  $P, P'$  – давление основного и заменяемого газа, Па;

$d, d'$  – существующий и перерасчетный диаметр.

- переход на другой газ, т.е. изменяются параметры газа  $Q_{н}^P, \rho, P$ :

$$d' = d \sqrt{\frac{Q_{н}^P}{(Q_{н}^P)'} \cdot \frac{P \cdot \rho'}{P' \cdot \rho}}, \text{ мм}$$

где  $Q_{н}^P$  и  $(Q_{н}^P)'$  – теплота сгорания основного и заменяемого газа, кДж/м<sup>3</sup>.

- изменяется теплота сгорания и плотность газа, давление не меняется:

$$d' = d \sqrt{\frac{Q_{н}^P}{(Q_{н}^P)'} \cdot \frac{\rho'}{\rho}}, \text{ мм}$$

- меняются  $Q_{н}^P$  и  $\rho$  газа при сохранении диаметра горелки, необходимо изменить давление газа перед соплом:

$$P' = P \frac{\rho'}{\rho} \left( \frac{Q_{н}^P}{Q_{н}^{P'}} \right)^2, \text{ Па.}$$

Перерасчет горелок возможен при замене углеводородных газов (природного на сжиженный, коксовый на полу-

коксовый и наоборот). При замене природного газа на доменный необходимо полностью выполнить расчет горелки.

Практика расчета горелок для природного газа среднего и высокого давления дает возможность сделать следующие выводы:

- инжекционные горелки высокого давления не нуждаются в установке диффузоров;
- переход от давления газа с 150 кПа на давление 300 кПа позволяет сократить горелку примерно в 1.6 раза.

Таким образом, инжекционные горелки, работающие на высоком давлении газа без диффузоров, получаются более простыми по устройству и более компактными.

### 1.9 Термическая переработка газообразного топлива

В настоящее время в технике наиболее распространены два варианта термохимической переработки углеводородных топлив: крекинг и конверсия.

**Крекинг** – процесс термического разложения углеводородных соединений под действием температуры на составляющие с целью получения из них сажи и водорода.



Например: при нагреве метана до 900-1200<sup>0</sup>С протекает следующая реакция:  $CH_4 = C + 2H_2 - 4100 \text{ кДж/м}^3$

При крекинге 1м<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> образуется 2м<sup>3</sup> H<sub>2</sub> и 12/22.4 = 0.536кг сажистого углерода. Эта реакция протекает с поглощением тепла, наиболее заметное течение реакции начинается с 900<sup>0</sup>С.

Применяют также крекинг для улучшения светимости факела при сжигании газов в теплотехнических установках

с радиационным видом теплообмена. Процесс протекает в устройствах называемых реформаторами.

**Конверсия** – превращение воздухом кислородом, паром, углекислым газом, происходящие с углеводородным газообразным топливом под действием температуры с целью получения газа с определенными свойствами.

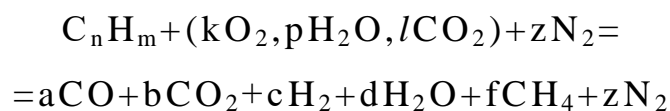
Конверсия углеводородов применяется в машиностроении для получения защитных газовых средств, и в металлургии в производстве восстановительных газов. Конверсию углеводородов используют при получении водорода для топливных элементов.

Разработан способ отопления нагревательных печей с применением конверсии природного газа в методических печах, обеспечивающих качество нагрева, снижения удельного расхода газа и потерь металла с окалиной путем создания полувосстановительной атмосферы в томильной зоне с последующим дожиганием образовавшихся продуктов конверсии в сварочной зоне. Сущность которого заключается в том, что в томильной зоне проводят парокислородную конверсии 50 процентов природного газа этой зоны в соотношении газ-пар-кислород 1:0.1-0.5:0.46-0.55, а образовавшаяся смесь продуктов сгорания и конвертируемого газа поступает в сварочную зону, в которой дожигается, что позволяет снизить расход природного газа на сварочную зону.

В процессе конверсии в присутствии окислителей углеводороды превращаются либо в метан, либо в водород и окись углерода. Метан, как основной продукт конверсии образуется на первой стадии конверсии углеводородов. Основными продуктами конверсии являются окись углерода (CO) и водород (H<sub>2</sub>). В качестве окислителя при конверсии

используют воздух, технический кислород, водяной пар, углекислый газ или их смеси. В зависимости от вида окислителя различают воздушную, кислородную, паровую и углекислотную конверсии.

В общем виде уравнение конверсии углеводородов имеет следующий вид:



Процессы конверсии углеводородов осуществляют при отношении кислорода к углероду больше единицы, чтобы избежать выделения в системе углерода.

Наличие углерода в продуктах конверсии резко снижает активность катализаторов, применяемых при конверсии углеводородов и затрудняет очистку технологических газов.

В связи с этим конверсию углеводородов следует вести таким образом, чтобы избежать сажеобразования.

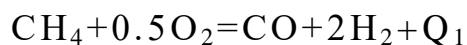
При кислородной конверсии и его смесей с азотом или другими окислителями при  $t = 900 - 1200$  °С и отношении  $O:C \geq 1.02 - 1.04$  выделение в системе свободного углерода термодинамически невозможно.

Конверсия углеводородов углекислым газом и водяным паром при тех же температурах протекает без образования сажи при отношении  $O:C \geq 1.2 - 1.3$ . К конверсии метана также относят реакцию неполного его горения с  $\alpha < 1$ .

### **1.9.1 Методика расчета равновесных составов продуктов конверсии углеводородов**

Для упрощения рассмотрим методику расчета равновесного состава продуктов конверсии метана. Для других

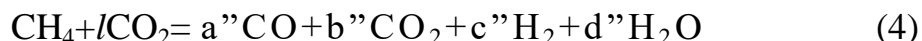
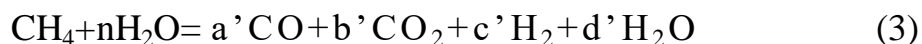
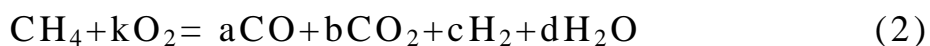
углеводородов принцип расчета не меняется. Конверсию метана осуществляем по следующим уравнениям:



При отношении  $\text{O}:\text{C} > 1.0$  продуктами конверсии метана, кроме  $\text{CO}$  и  $\text{H}_2$  являются также  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}$ .

Методика расчета равновесного состава продуктов конверсии метана зависит от количества образующихся компонентов реакции конверсии. Чем их меньше, тем проще методика расчета.

Самой простой является методика расчета, когда продукты конверсии углеводородов состоят из  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ , и  $\text{H}_2$ , в этом случае реакция конверсии метана имеет вид:



где  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  – количество соответствующих компонентов в продуктах конверсии,  $\text{м}^3$ .

Для определения равновесного состава продуктов конверсии метана по уравнениям (1-4) необходимо составить балансовые уравнения по углероду, водороду и кислороду:

- баланс по углероду:

$$a + b = 1 \quad \text{— для уравнений (1-3);}$$

$$a + b = 1 + l \quad \text{— для уравнения (4).}$$

- баланс по водороду:

$c+d=2$  - для уравнения (1,2,4);

$c+d=2+n$  - для уравнения (3).

- баланс по кислороду:

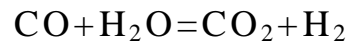
$a+2b+d=2k \cdot \alpha$  - для уравнения (1);

$a+2b+d=2k$  - для уравнения (2);

$a+2b+d=n$  - для уравнения (3);

$a+2b+d=2l$  - для уравнения (4);

Если в уравнении (1-4) задаться  $k$ ,  $\alpha$ ,  $n$ ,  $l$  то неизвестным останутся 4 величины ( $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ ). Для того чтобы найти эти величины системы трех выше приведенных балансовых уравнений недостаточно. Эту задачу можно решить, дополнительно воспользовавшись константой равновесия реакции водяного газа:



$$k_p = \frac{P_{\text{CO}_2} \cdot P_{\text{H}_2}}{P_{\text{CO}} \cdot P_{\text{H}_2\text{O}}} \quad (5)$$

где  $P_{\text{CO}_2}$ ,  $P_{\text{H}_2}$ ,  $P_{\text{CO}}$ ,  $P_{\text{H}_2\text{O}}$  - парциальные давления продуктов конверсии.

$$P_{\text{CO}_2} = \frac{b}{a+b+c+d} \cdot P_{\text{общ}}, \quad P_{\text{CO}} = \frac{a}{a+b+c+d} \cdot P_{\text{общ}}$$

$$P_{\text{H}_2} = \frac{c}{a+b+c+d} \cdot P_{\text{общ}}, \quad P_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{d}{a+b+c+d} \cdot P_{\text{общ}}$$

где  $P_{\text{общ}}$  - давление в аппарате конверсии.

Подставим значения парциальных давлений в уравнение(5) получим:

$$k_p = \frac{b \cdot c}{a \cdot d}$$

Имея систему из четырех уравнений с четырьмя неизвестными ( $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ ) и решив ее можно определить объем

продуктов конверсии  $V_{п.к}=a+b+c+d$  и их равновесный состав (%) по следующим выражениям:

$$CO_2 = \frac{b}{V_{п.к}} \cdot 100, \quad CO = \frac{a}{V_{п.к}} \cdot 100,$$

$$H_2 = \frac{c}{V_{п.к}} \cdot 100, \quad H_2O = \frac{d}{V_{п.к}} \cdot 100$$

Значения константы равновесия реакции водяного газа для различных температур можно найти в термодинамических справочниках, в приложении В или рассчитать по уравнению:

$$Lgk_p = \frac{2170.66}{T} + 5.094 \cdot 10^{-4} \cdot T - 8.163 \cdot 10^{-8} \cdot T^2 \dots - 2.4417$$

Условие для протекания газокислородной конверсии:

$$k=0,51-2,51; t_{конв}=800-1400^{\circ}C$$

Для газовой конверсии:  $\alpha=0,3-0,5$   $t_{конв}=1000-1300^{\circ}C$ .

Конверсию углеводородных соединений можно осуществлять как с отдельными углеводородными соединениями, так и с их смесями. Например: Дана смесь:  $CH_4=30\%$ ;  $C_2H_6=20\%$ ;  $C_3H_8=50\%$ . Возможны два варианта подхода к решению:

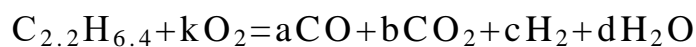
- выводят условную формулу по составу смеси:

$$m = \frac{1 \cdot 30 + 2 \cdot 20 + 3 \cdot 50}{100} = 2,2$$

$$n = \frac{4 \cdot 30 + 6 \cdot 20 + 8 \cdot 50}{100} = 6,4$$

т.е. получаем  $C_{2.2}H_{6.4}$

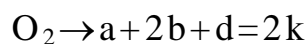
Тогда для кислородной конверсии:



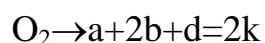
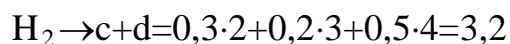
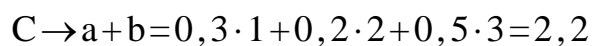
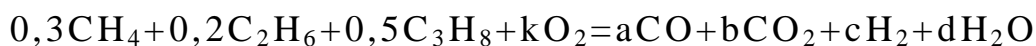
$$C \rightarrow a+b=2,2$$

$$H_2 \rightarrow c+d=3,2$$





- или рассчитывают балансовые уравнения по углероду и водороду, подставляя соответствующие доли газов:



Необходимо отметить, что по первому варианту расчеты равновесных составов продуктов конверсии проще, хотя и требуют несложных предварительных расчетов.

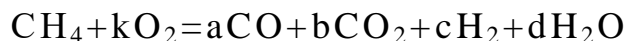
### 1.9.2 Определение температуры процесса конверсии

В рассмотренной выше нами методике выполнен расчет равновесного состава продуктов конверсии при известной температуре конверсии, но иногда требуется определить и температуру конверсии. Расчеты усложняются, при этом составляется тепловой баланс процесса и задача решается методом последовательных приближений.

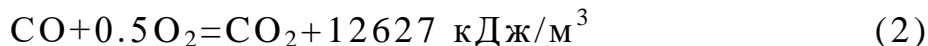
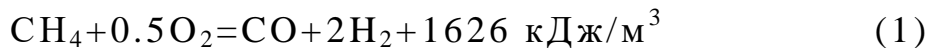
В первом приближении произвольно задают температуру процесса, определяют равновесный состав продуктов конверсии и по нему определяют тепловой эффект конверсии и теплоемкость продуктов конверсии при принятой температуре.

Из теплового баланса уточняют температуру. При несоответствии принятой и расчетной температуры расчет повторяют при вновь принятой температуре, которая находится в интервале между ранее принятой и расчетной. Расчет повторяют до тех пор, пока разность между принятой и расчетной температурой будет меньше или равна 5 градусам.

Уравнение конверсии:

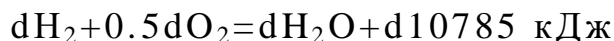
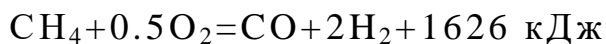


Для составления теплового баланса используем тепловые эффекты следующих реакций:



При конверсии метана сначала идет его разложение по реакции (1) с образованием CO и H<sub>2</sub>. Затем часть CO и H<sub>2</sub> сгорают по реакциям (2,3). Причем CO сгорело столько, сколько образовалось CO<sub>2</sub> в продуктах конверсии, т.е. “b”, а H<sub>2</sub> сгорело столько, сколько образовалось H<sub>2</sub>O в продуктах конверсии, т.е. “d”.

Составим уравнения разложения метана, горения CO и H<sub>2</sub> и просуммируем:



$$\text{где } k = 0.5(a + 2b + d); \quad a = 1 - b$$

$$c_{\text{п.к}}^{\text{тк}} = c_{\text{CO}}^{\text{тк}} \cdot \text{CO} + c_{\text{CO}_2}^{\text{тк}} \cdot \text{CO}_2 + c_{\text{H}_2}^{\text{тк}} \cdot \text{H}_2 + c_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{тк}} \cdot \text{H}_2\text{O} + c_{\text{N}_2}^{\text{тк}} \cdot \text{N}_2,$$

кДж/м<sup>3</sup>·К.

где  $c_{\text{п.к}}^{\text{тк}}$  – теплоемкость продуктов конверсии при температуре  $t_{\text{к}}$ .

Тепловой баланс процесса конверсии:

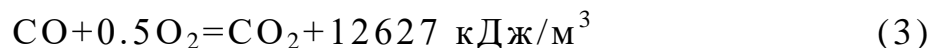
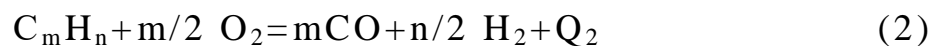
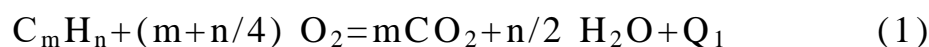
$$Q_{\text{кон}} = c_{\text{п.к}}^{\text{тк}} \cdot V_{\text{п.к}} \cdot t_{\text{к}}, \text{ кДж/м}^3$$

Тогда температура конверсии равна:

$$t_{\text{к}} = \frac{Q_{\text{кон}}}{c_{\text{п.к}}^{\text{т}} \cdot V_{\text{п.к}}}, \text{ } ^\circ\text{C}$$

где  $V_{п.к}$  - объем продуктов конверсии.

Определение температуры конверсии по аналогии с  $CH_4$  в общем виде:



$Q_1$  – определяем для реакции полного горения данного газа по (табл. Л1).

Тогда по закону Гесса:  $Q_1 = Q_2 + Q_3 + Q_4$ .

Откуда:  $Q_2 = Q_1 - mQ_3 - n/2 Q_4$

где значения коэффициентов  $m$  и  $n$  из уравнения (2)

Тогда тепловой эффект реакции конверсии данного газа равен:  $Q_{кон} = Q_2 + b \cdot 12627 + d \cdot 10785$ , кДж/м<sup>3</sup>

Затем определяем температуру конверсии:

$$t = \frac{Q_{кон}}{c_{п.к} \cdot V_{п.к}}$$

Температура процесса считается найденной, если последнее определение температуры отличается от предыдущего на 5 градусов. Рассчитанная таким образом температура конверсии является калориметрической. Действительная же температура будет значительно меньше.

После определения температуры конверсии определяем процентный состав продуктов конверсии, а затем освобождаемся от влаги и восстанавливаем  $CO_2$  до  $CO$ .

Итак, в состав продуктов конверсии входят  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $H_2$ ,  $N_2$ . Для проведения безокислительного нагрева заготовок металла необходимо убрать окислительные газы

CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>O и тогда полученный газ может быть применен как защитный.

Для проведения осушки необходимо охладить продукты конверсии до температуры точки росы. А затем пересчитать состав газа на сухой, т.е.:

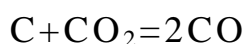
$V'_{п.к} = V_{п.к} - d$ , тогда газ воздушной конверсии будет состоять из CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> и иметь следующий состав, %:

$$CO = \frac{a \cdot 100}{V'_{п.к}}, \quad H_2 = \frac{c \cdot 100}{V'_{п.к}}, \quad CO_2 = \frac{b \cdot 100}{V'_{п.к}}, \quad N_2 = \frac{3.76 \cdot \alpha \cdot k \cdot 100}{V'_{п.к}}$$

где  $\alpha$  - коэффициент расхода воздуха в воздушной конверсии,  $k$  - коэффициент стоящий перед кислородом в реакции полного горения углеводородного соединения, так для CH<sub>4</sub>  $k=2$ ; C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>  $k=3.5$ , C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>  $k=5$  и т.д.



Очистку продуктов конверсии от CO<sub>2</sub> производим путем пропускания конвертированного газа через раскаленный уголь с температурой 1200 °С:



Тогда количество необходимого угля на 1 м<sup>3</sup> CO<sub>2</sub> составит:

$$m_c = \frac{12 \cdot b}{22.4} = \frac{\text{кг. угля}}{1 \text{ м}^3 \text{ газа}}$$

Определяем состав восстановительного газа, %:

$$CO = \frac{(a + 2b) \cdot 100}{V''_{п.к}}, \quad H_2 = \frac{c \cdot 100}{V''_{п.к}}, \quad N_2 = \frac{V_{N_2} \cdot 100}{V''_{п.к}}$$

где  $V''_{п.к} = a + 2b + c + V_{N_2}$

Окончательный состав продуктов воздушной конверсии состоит из CO, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>; кислородной - CO, H<sub>2</sub>.

## 2 ПОВЕРХНОСТНОЕ ГОРЕНИЕ ГАЗОВ

Поверхностное горение отличается от обычного факельного горения быстротой протекания реакции. Для того чтобы создать условия протекания поверхностного горения необходимо подготовить смесь и подогреть ее до температуры воспламенения.

**Поверхностное** горение еще называется **беспламенным** горением. Сжигание горючей смеси на поверхностях твердых тел, обладающих каталитическими свойствами, называется **поверхностным** или **беспламенным** горением. Практикой установлено, что каталитическими свойствами обладают платина, палладий и иридий. Кроме того каталитическими свойствами обладают также огнеупоры и все окислы металлов.

Существует два варианта горения газов:

- гомогенное горение протекает при  $t_{\Gamma} > t_{\text{воспл}}$  - это горение быстрое и с пламенем и при  $t_{\Gamma} < t_{\text{воспл}}$  - медленное горение и без пламени;
- гетерогенное горение на раскаленных твердых поверхностях - поверхностное горение.

На основании исследований Бонн сделал следующие выводы:

- при соприкосновении горючей смеси с раскаленной поверхностью горение ускоряется;
- при температуре свыше  $500^{\circ}\text{C}$  все твердые тела обладают способностью ускорять горение газа в зависимости от химического состава и состояния поверхности;
- при температуре свыше  $1000^{\circ}\text{C}$  разница в каталитических свойствах твердых поверхностей практически отсутствует;

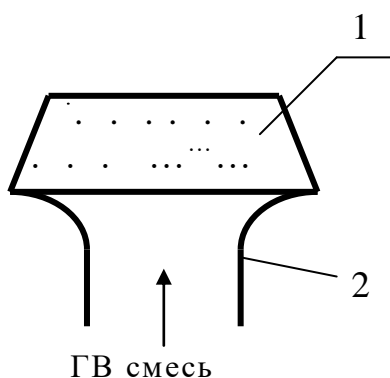
- каталитическое действие раскаленной твердой поверхности объясняется способностью абсорбировать молекулы газа и кислорода и ионизировать их за счет поверхностной энергии;
- горение происходит у поверхности, поэтому сжигание газа можно сконцентрировать в том месте, где требуется подвод тепла;
- при соприкосновении с раскаленной поверхностью газ полностью сгорает при минимальных расходах воздуха.

Методы беспламенного горения можно условно разбить на четыре основные группы.

### 2.1 Сжигание газа в пористых или перфорированных средах или насадках

При этом методе подогрев смеси идет за счет теплообмена со стенками каналов малого диаметра или теплоотдачей от пламени зернистых набивок. При этом возможно несколько случаев:

- насадка пористая (рисунок 3.1).



1 – огнеупорная пористая насадка; 2 – корпус горелки.

Рисунок 2.1 – Схема пористой насадки

Температура поверхности  $t_{\text{пов}}=850 - 1000$  °С, пиromетрический коэффициент излучения насадки  $\eta_{\text{изл}}=0,56-0,57$ . Пиromетрический коэффициент излучателя горелки – отношение удельного

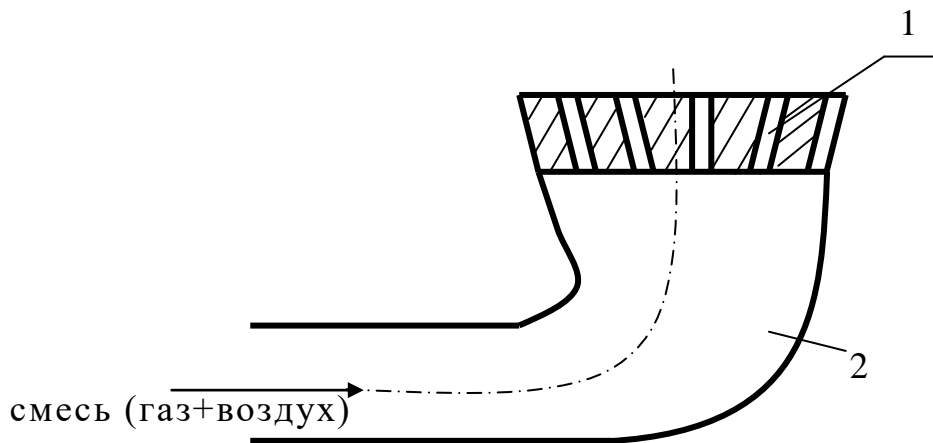
лучистого теплового потока ( $q_l$ ) к удельной тепловой нагрузки горелки т.е.:

$$\eta = \frac{q_l}{q_2} \cdot 100\%, \quad q_2 = \frac{Q_2}{F} = \frac{V_0^0 \cdot Q_{H^P}}{F}, \text{ Вт/м}^2,$$

$$q_l = \varepsilon_k \cdot C_0 \left[ \left( \frac{T_{изл}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_0}{100} \right)^4 \right], \text{ Вт/м}^2$$

где  $Q_2$  – тепловая мощность горелки, кВт,  $V_0^0$  – расход газа, м<sup>3</sup>/с,  $Q_{H^P}$  – теплота сгорания газа, кДж/м<sup>3</sup>,  $F$  – поверхность излучателя, м<sup>2</sup>,  $\varepsilon_k$  – степень черноты,  $C_0$  – коэффициент излучения абсолютно черного тела, Вт/м<sup>2</sup>К<sup>4</sup>,  $T$  – температура излучателя, К,  $T_0$  – температура окружающей среды, К.

Применяется пористая насадка в различных областях народного хозяйства (сушка, разогрев, нагрев и т.д.);  
- перфорированные насадки (газовые горелки ГГИИ инфракрасного излучения, рисунок 2.2).



1 – каналы в насадке; 2 – корпус горелки.

Рисунок 2.2 – Перфорированная насадка инфракрасного излучения

Перфорированные насадки бывают двух типов:

1. Низкотемпературные:  $t=750-950^0\text{C}$ .
2. Высокотемпературные:  $t=1200-1400^0\text{C}$ ,  $\eta_{\text{луч.коэфф.}}=0.5-0.65$

Они применяются во всех областях народного хозяйства, где требуются достаточно достижимые температуры.

- насадка зернистый слой (рисунок 2.3).

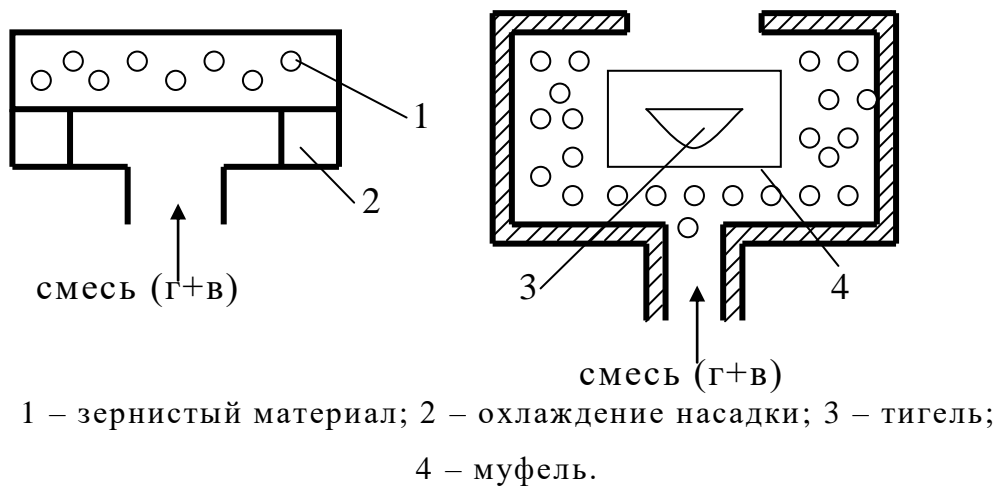


Рисунок 2.3 – Насадка зернистый слой

Температура зернистого слоя 1000-1200°C,  $\eta_{\text{изл.}}=0,4-0,45$ .

В зернистом слое можно сжигать газ с низкой теплотой сгорания (доменный, генераторный).

Применяют насадки при обогреве муфельных или тигельных печей, при нагреве или плавлении материалов в вакууме или защитной среде.

## 2.2 Сжигание газоздушных смесей при внезапном расширении

Этот метод – сжигание газоздушной струи при ее внезапном расширении в огнеупорном туннеле. Подогрев смеси осуществляется путем теплообмена между струей смеси и зоной рециркуляции продуктов горения. Существует несколько вариантов:

- туннельные горелки (рисунок 2.4)



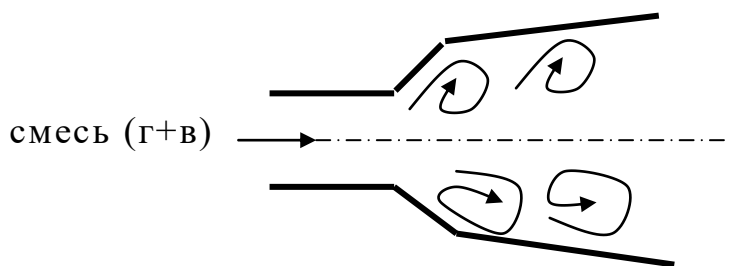
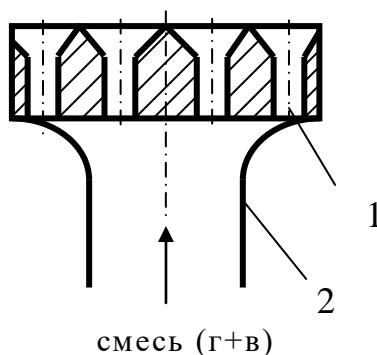


Рисунок 2.4 – Схема туннельной горелки

Температура поверхности туннеля  $1200-1500^{\circ}\text{C}$ ,  $\eta=0.5-0.55$

Применяют, когда требуется сравнительно высокая температура и высокая плотность излучения;

- панельные горелки (рисунок 2.5):



1-огнеупорный канал с расширением; 2-корпус горелки.

Рисунок 2.5 – Панельные горелки

Панельная горелка представляет собой панель, набранную из большого количества малых туннельных горелок и принципиально не отличается от туннельной горелки, но так как туннели небольшой длины, то теплонапряжение панельной горелки меньше, чем туннельной. Температура поверхности панели равна  $950-1000^{\circ}\text{C}$ ,  $\eta=0.35-0.40$ . Применяют панельные горелки при обогреве различных материалов и очень широко в трубчатых печах нефтепереработки.

При розжиге панельных и туннельных горелок пламя находится вне туннеля и по мере разогрева пламя втягивается внутрь. Для более устойчивой работы горелок иногда туннель выполняют суженным на конце – это так называемые туннельные горелки (рисунок 2.6).

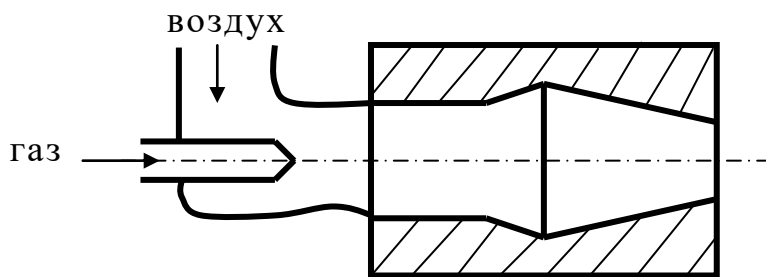


Рисунок 2.6 – Горелка АН СССР

Давление газа от 10 кПа до 30 кПа, воздуха 4-6 кПа. Давление внутри туннеля 2 кПа. Скорость газовой смеси на выходе 100-200 м/с. Недостатком является большое сопротивление горелки по воздушному тракту.

### 2.3 Сжигание газа на раскаленных огнеупорах

К этой группе относятся случаи сжигания горючей смеси без предварительного подогрева на равномерно омываемых параболических, полусферических и плоских поверхностях или с дожиганием непрореагировавшей смеси на поверхности свода или стенок (топки) теплотехнического агрегата. Отличительной особенностью этого способа является большие радиационные поверхности.

Применяют данный метод для равномерного нагрева с высоким коэффициентом излучения. При этом возможны следующие случаи:

- чашечные горелки инфракрасного излучения (рисунок 2.7).

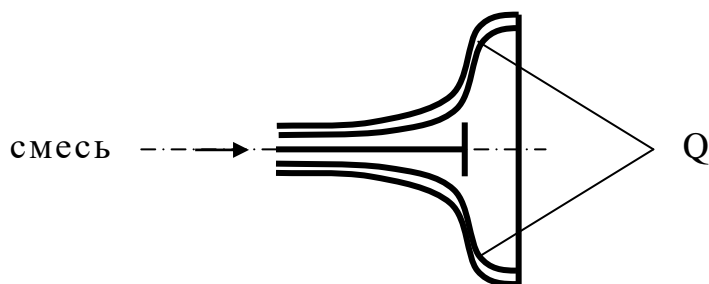


Рисунок 2.7 – Схема горелки инфракрасного излучения

Это горелки, в которых сжигание производится в керамиче-

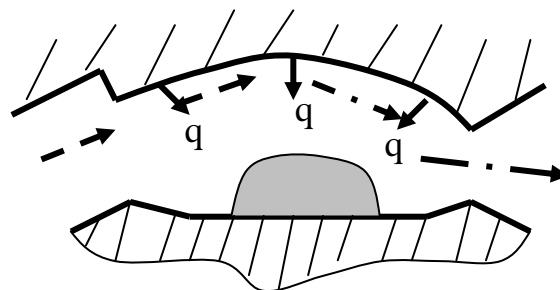
ских чашеобразных насадках. Газовоздушная смесь может подогреться в самой чашке т.е. в этом случае газ и воздух могут подаваться раздельно. При зажигании горелки пламя вытягивается, а затем с разогревом чаши укорачивается. Тепловое состояние чаши следующее:  $t_{\text{пов. внутр чаши}} = 900-1000^{\circ}\text{C}$ ;  $t_{\text{нар}} = 150-400^{\circ}\text{C}$ ;  $\eta_{\text{л.коэф}} = 0.55$

Применяют в сушилках, в промышленных печах для обеспечения равномерного высокотемпературного разогрева толстостенных стекол, для прогрева чугунных изделий под сварку и т.д;

- плоско-пламенные горелки.

В плоско-пламенных горелках угол раскрытия факела  $180^{\circ}$ . Раскрытие осуществляется благодаря наличию направляющих элементов и предварительного закручивания потоков газа и воздуха. При применении плоско-пламенных горелок достигается более равномерное и интенсивное горение. Существует 7 типов размеров ГПП1-7. Давление воздуха 3-4кПа, газа 12-20кПа. Производительность ГПП от 5 до  $160\text{м}^3/\text{ч}$  природного газа (Приложение А). Применяют в печах газовой конверсии, в термических и нагревательных печах для нагрева заготовок под термообработку;

- огнеупорные туннели с дожиганием не полностью прореагировавшей смеси на поверхности свода печи (рисунок 2.8).



---> - смесь; —> - тепловой поток; - · -> - дым.

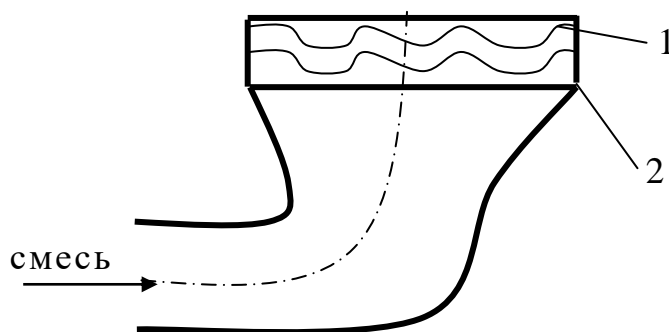
Рисунок 2.8-Дожи́гание не полностью прореагировавшей смеси на поверхности свода

Смесь направляют по туннелю на свод, который от догорания смеси разогревается и от свода греется металл,  $t_{\text{пов.св}}=1400-1500^{\circ}\text{C}$ . Применяется в промышленных печах (отражательные печи цветной и черной металлургии).

#### 2.4 Сжигание газов (смеси) в малых объемах с сильно развитой контактирующей поверхностью

Этот способ предусматривает сжигание газов без предварительного подогрева с искусственно развитой контактирующей поверхностью. Существует несколько разновидностей этой группы:

- горелки с металлическими сетчатыми насадками (как газовые горелки инфракрасного излучения, рисунок 2.9).



1 – металлическая сетка с мелкими ячейками; 2 – корпус горелки.

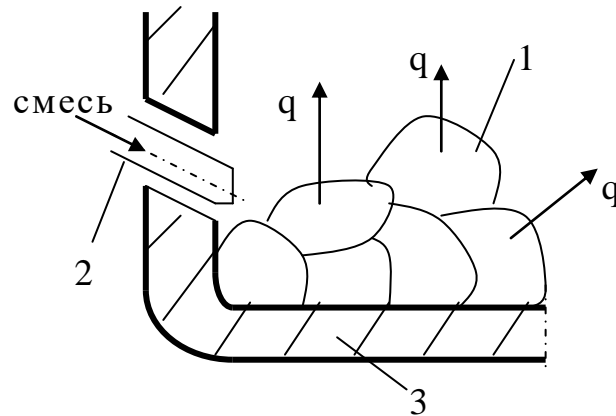
Рисунок 2.9 – Схема горелки с металлическими сетками

Излучающей панелью служит набор пластин из жаропрочных и окалиностойких сталей с мелкими ячейками. Горение смеси происходит в пространстве между сетками. Сетки раскаляются и служат источником излучения. Температура поверхностей сеток  $850-950^{\circ}\text{C}$ ,  $\eta_{\text{п.коэф}}=0.5-0.6$ . Область применения как и для горелок инфракрасного излучения;

- ударные горелки (рисунок 2.10).

Очень часто в теплотехнических агрегатах для улучшения полноты сгорания топлива, перед горелкой насыпают горку из

боя огнеупорного кирпича (шамотного) и смесь газа с воздухом направляется в эту горку. Материал горки разогревается и служит источником тепла для тепловой обработки материала. Температура поверхности горки  $750-1300^{\circ}\text{C}$ ,  $\eta=0.5-0.8$ .



1-горка из боя огнеупорного материала; 2-горелка; 3-ограждение топki.

Рисунок 2.10 – Схема ударной горелки

Применяется в промышленных печах, технологических агрегатах, и в парогенераторах.

На основании вышеизложенного можно привести преимущества поверхностного сжигания газообразного топлива:

- достижение равномерного распределения температуры в теплотехнической установке;
- возможность концентрации тепла в нужном месте т.е. более точная регулировка теплового процесса;
- возможность поддержания в теплотехническом агрегате требуемой атмосферы (окислительной, восстановительной, нейтральной);
- обеспечение полноты сжигания топлива при минимальных значениях коэффициента расхода воздуха,  $\alpha$ ;
- минимальное образование вредных компонентов (отсутствие двуокиси углерода, окиси азота т.к. нет избытка кислорода,  $\text{O}_2$ ).

Недостатком поверхностного горения газов является невозможность подогрева воздуха.

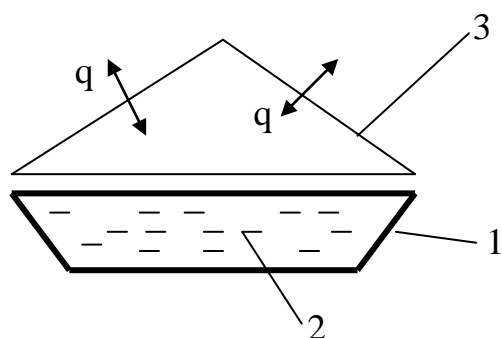
### 3 ГОРЕНИЕ ЖИДКИХ ТОПЛИВ

Горение жидких топлив возможно: со свободной поверхностью, в капле и в факеле.

Каждое жидкое горючее, как и любое жидкое вещество обладает определенной упругостью пара над своей поверхностью, которая увеличивается с увеличением температуры жидкости. Рассмотрим более подробно эти способы.

#### 3.1 Горение жидкости со свободной поверхностью

Схема горения жидкости со свободной поверхностью представлена на рисунке 3.1. При зажигании жидкого топлива, имеющего свободную поверхность, загорается ее пар, содержащийся в пространстве над поверхностью, образуя факел. За счет тепла, излучаемого факелом, испарение резко увеличивается. При установившемся режиме теплообмена между факелом и зеркалом жидкости, количество испаряющегося, а следовательно и сгорающего горючего достигает максимального значения и далее остается постоянным во времени.



1 – металлическая емкость; 2 – жидкое топливо; 3 – факел.

Рисунок 3.1 – Схема горения жидкого топлива со свободной поверхностью

Практика показала, что при сжигании жидких топлив со

свободной поверхности горение протекает в паровой фазе. Факел (конусообразной формы) устанавливается на некотором удалении от поверхности жидкости и ясно видна темная полоска, отделяющая факел от среза ванны с жидким горючим.

Интенсивность излучения зоны горения на зеркало испарения не зависит от формы и величины факела, а зависит только от физико-химических свойств горючего и является характерной константой для данного вида топлива.

В связи с тем, что жидкое горючее сгорает в паровой фазе, то при установившемся режиме скорость горения определяется скоростью испарения жидкости с его зеркала. Тепло, излучаемое факелом на зеркало горючей жидкости, расходуется на подогрев жидкости до температуры кипения и на парообразование, можно записать уравнение теплового баланса для 1 м<sup>2</sup> зеркала испарения в виде:

$$q_{\text{изл}} = W_{\text{г}} [c_{\text{ср}} (T_{\text{к}} - T_0) + \lambda_{\text{п}}] \quad (3.1)$$

где  $q_{\text{изл}}$  – количество тепла, излучаемое факелом на зеркало жидкости, кВт/м<sup>2</sup>;

$W_{\text{г}}$  – скорость горения отнесенная к единице поверхности испарения, кг/м<sup>2</sup>·с;

$c_{\text{ср}}$  – средняя теплоемкость жидкости, кДж/кг·К;

$T_{\text{к}}$  – температура кипения жидкости, К;

$T_0$  – температура горючей жидкости до воспламенения, К;

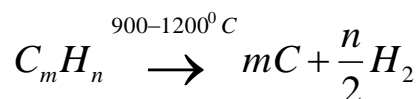
$\lambda_{\text{п}}$  – теплота парообразования, кДж/кг.

Из уравнения (3.1) следует, что массовая скорость горения для заданной жидкости со свободной поверхности зависит от температуры подогрева жидкости и интенсивности

излучения ее диффузионного факела на зеркало испарения. Устойчивое горение протекает на поверхности конуса, где образуется стехиометрическая смесь. Внутри конуса находятся пары и продукты горения. Горение происходит в диффузионной области, а скорость горения определяется скоростью диффузии кислорода и интенсивностью испарения жидкости.

При горении жидких топлив, имеющих свободную поверхность наблюдается большой химический недожог, характерный для каждого вида топлива, %: спирт – 5,7; бензин – 12,7; керосин – 17,7; бензол – 18,5.

Кроме того внутри конуса пары жидкого топлива подвергаются термическому разложению:



Образовавшийся сажистый углерод, нагревается до температуры продуктов сгорания и ярко светится.

Особенностью сжигания жидких топлив со свободной поверхности является:

1. Горение жидкого топлива происходит после его испарения (в паровой фазе), а скорость горения определяется скоростью испарения за счет тепла излучающего зоной горения на поверхность испарения и скоростью диффузии кислорода в зону горения.
2. Скорость горения жидкого топлива со свободной поверхности растет с повышением температуры нагрева его и не зависит от величины и формы зеркала поверхности.
3. Интенсивность излучения зоны горения на зеркало испарения зависит только от физико-химических свойств то-



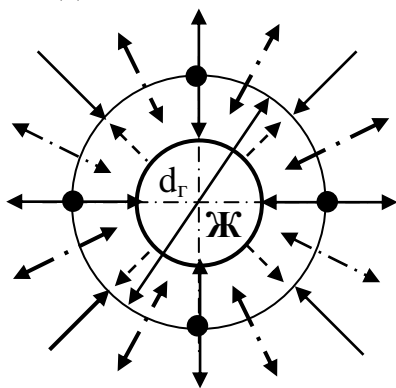
плива и является характерной константой для каждого вида топлива.

4. Для горения жидкого топлива со свободной поверхности характерен большой химический недожог, величина которого обусловлена видом топлива.

Сжигание жидкого топлива со свободной поверхности в промышленности применяется очень редко (испарительные горелки в бытовых аппаратах).

### 3.2 Горение капли жидкого топлива

Горение капли жидкого горючего можно представить следующим образом: капля жидкого топлива окружена атмосферой, насыщенной парами этого горючего. Вблизи от капли по сферической поверхности с диаметром ( $d_r$ ) устанавливается зона горения. Химическое реагирование смеси паров жидкого топлива с окислителем происходит весьма быстро, поэтому зона горения весьма точна. Скорость горения определяется более медленной стадией – скоростью испарения горючего и скоростью доставки окислителя в зону горения (рисунок 3.2).



← — — — — — - кислород; ← — — — — — - пары жидкого топлива;  
 ← ● — — — — — - излучение факела; ← · — — — — — - продукты сгорания.

Рисунок 3.2 – Схема горения капли жидкого топлива

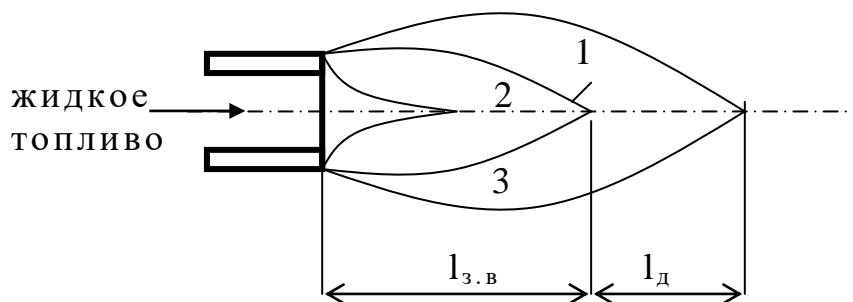
В пространстве между каплей и зоной горения находятся пары жидкого топлива, продукты термического разложе-

ния и продукты горения. В пространстве вне зоны горения - воздух и продукты сгорания. К зоне горения изнутри диффундируют пары топлива, а снаружи кислород. Здесь эти компоненты вступают в химическое взаимодействие, которое сопровождается выделением тепла. Из зоны горения тепло переносится наружу и к капле, а продукты сгорания диффундируют в окружающее пространство и в пространство между зоной горения и каплей.

В связи с тем, что горение жидких топлив происходит после их испарения в паровой фазе, то интенсификация связана с интенсификацией испарения и смесеобразования.

### 3.3 Сжигание жидких топлив в факеле

Представляет значительный интерес сжигание жидких топлив в факеле, т.е. промышленный способ, который широко применяется в огнетехнических установках (рисунок 3.3).



1 – зона воспламенения; 2 – внутренняя зона – зона испарения и образования горючей смеси; 3 – зона горения.

Рисунок 3.3 – Схема факела жидкого топлива

Длина факела жидкого топлива определяется суммой длин зоны воспламенения и зоны догорания

$$L_{\phi} = l_{з.в} + l_{д}$$

Из рассмотренного выше следует, что для интенсификации процесса сжигания жидких топлив необходимо увели-

чить поверхность испарения путем распыления жидкого топлива на мельчайшие капельки и обеспечить хорошее смешивание паров с воздухом при равномерном распределении мелкодисперсного топлива в нем. Эти две задачи выполняют устройства называемые форсунками, которые распыливают жидкое топливо в потоках воздуха.

Во внутренней области парообразные углеводороды подвергаются нагреву, который сопровождается окислением и расщеплением их. Процесс окисления начинается при сравнительно низких температурах 200-300°С. При температуре 300-400<sup>0</sup>С и выше наступает процесс термического разложения.

Из всех нефтяных топлив в энергетике применяется лишь мазут. Мазут – остаток от перегонки нефти при температуре приблизительно равной 300 °С. По составу мазут – углеродное топливо. Горение идет в факеле. Горючая часть жидкого топлива состоит из сложных углеводородных соединений.

Основными звеньями этого сложного процесса сжигания жидкого топлива в факеле являются: перемешивание горючего с кислородом воздуха, нагрев и испарение капли топлива, разложение (крекинг) углеводородов на водород и сажистый углерод, химическая реакция горения и отвод продуктов сгорания из зоны горения.

### **3.3.1 Распыление жидкого топлива**

Для организации факельного сжигания жидкого топлива необходимо обеспечить его распыливание. Распыление жидкого топлива – процесс дробления струи на мелкие капли. В процессе распыливания необходимо преодолеть силы сцеп-

ления и поверхностного натяжения жидкости. Распыление – сложный физико-механический комплекс и осуществляется следующими способами:

1. Внутриканальный распад жидкости под действием сил трения и кавитации при протекании жидкости со значительной скоростью через узкие проходные (сечение) отверстия.

Этот способ осуществляется в механических форсунках, т.е. жидкое топливо продавливают через малые выходные отверстия под большим давлением. В механических форсунках давление жидкости достигает 5 МПа.

2. Распад струи жидкого топлива на капли под действием сил трения и ударов, вызванных значительной скоростью истечения специальных распылителей (пар, газ, воздух и др.).

Радиус распыленных частиц топлива при механическом распыливании составляет порядка 0.2 мм, а при паровом (воздушном, газовом) распыливании 0.02 мм. Кроме того, размеры частиц должны быть мелкими и однородными.

Совершенно очевидно, что распыливание – сложный процесс, происходящий под влиянием распылителя или внутриканального распада, на который влияют разность скоростей распылителя и топлива, их плотности, температура, поверхностное натяжение, вязкость, угол встречи распылителя с топливом и давление жидкости.

По равномерности и дисперсности распыления определяют качество работы распыливающих устройств, но для организации процесса сжигания жидкого топлива недостаточно мелко и однородно его распылить. Очень важно произвести качественное его смешивание с воздухом. Смесеобразование топлива с воздухом осуществляется с помощью форсунок и

регистров для подачи воздуха, в которые подают топливо и воздух. Для улучшения перемешивания применяют следующие приемы: встречные потоки, вихревые потоки, улиточный подвод воздуха (распылителя), тангенциальный подводы (топлива и распылителя).

Смесь частиц топлива и воздуха при выходе из форсунки загорается не сразу, а на некотором расстоянии от устья, т.е. загорание смеси, происходит там, где находится стехиометрический состав смеси и достаточная температура для ее воспламенения. Для создания устойчивого горения (без срывов и пульсаций) необходимо стабилизировать факел путем хорошей подготовки топлива (фильтрация, подогрев), тонкого распыливания, хорошего смесеобразования, создание высокой температуры рабочего пространства в топке (более  $1000^{\circ}\text{C}$ ), подачей всего воздуха в устье факела, завихрение и турбулизация потоков.

### 3.3.2 Радиация факела жидкого топлива

Лучеиспускательная способность мазута больше чем газа т.к. в процессе его горения происходит одновременно и термическое разложение с выделением сажистого углерода, который раскаляясь до температуры горения, светится. Тяжелые углеводороды при разложении выделяют больше сажистых частиц, чем легкие, и их факел всегда будет ярче.

Очень часто на практике мазут подмешивают к газообразному топливу для увеличения светимости факела, расход которого составляет 15-30% по теплу. Степени черноты различных топлив следующие:  $\varepsilon_{\text{газ.фак}}=0.4$ ;  $\varepsilon_{\text{антрацит}}=0.45$ ;  $\varepsilon_{\text{угольн.пыли}}=0.7$ ;  $\varepsilon_{\text{мазута}}=0.85$ .

### 3.4 Устройства для сжигания топлив

Жидкое топливо сжигают с помощью форсунок. Форсунка – основное устройство для распыливания топлива, регулировки его подачи, смешения с воздухом и сгорания, определяющее форму, длину и направленность факела.

Распыливание жидкости форсунками широко используется в технике. Особенно велика роль форсунок в устройствах для сжигания жидкого топлива (двигатели внутреннего сгорания, паровые котлы, промышленные печи). Экономичность и интенсивность процесса сжигания распыленного жидкого топлива в камерах сгорания во многом зависит от качества распыливания топлива, равномерности распределения в потоке окислителя, дальнобойности факела и некоторых других факторов, зависящих от работы форсунок. Форсунки широко используются в технологических аппаратах химической, строительной, пищевой промышленности, сельском хозяйстве и других отраслях народного хозяйства.

Теоретические и экспериментальные исследования процесса распыливания, изучение влияния на процесс распыливания конструктивных и режимных параметров различных типов форсунок позволяют наиболее обоснованно произвести выбор их конструкций.

К форсункам предъявляются следующие требования:

1. Тонкое и равномерное распыливание.
2. Хорошее смесеобразование (распыленного топлива с воздухом).
3. Тонкое и легкое регулирование топлива и соотношение топливо – воздух.
4. Максимальное использование энергии распылителя.

5. Обеспечение устойчивого факела заданной формы и длины.
6. Простота конструкции и монтажа.
7. Надежность и удобство в эксплуатации.
8. Незасоряемость и отсутствие подтеков.
9. Удобство в управлении и регулировании.
10. Легкость и удобство ремонтов, осмотров и чисток.
11. Небольшая стоимость и металлоемкость.

Существующие форсунок обладают следующими недостатками:

1. Низкий КПД распылителя.
2. Грубое и неравномерное распыливание.
3. Недостаточное смесеобразование.
4. Неустойчивый и неправильно направленный факел.
5. Несоответствие формы и размера факела, форме и размерам рабочего пространства печи.
6. Нарушение пропорционирования соотношения топливо – воздух при изменении расхода мазута.
7. Снижение качества распыливания при изменении расхода топлива.
8. Конструктивные и эксплуатационные недостатки, приводимые к подтекам, засоряемости, искривлению факела.

Недостатки форсунок приводят к перерасходу топлива, ухудшению стойкости и технико-экономических показателей работы теплотехнических агрегатов.

### **3.4.1 Классификация форсунок**

В настоящее время еще не создано достаточно обоснованных классификаций применяющихся форсунок. Их можно классифицировать по ряду признаков (по давлению, по спо-

собу регулирования производительности, по принципу распыла и т.д). Однако основным признаком классификации форсунок является принцип распыливания. По этому признаку все форсунки можно разбить на 5 классов: механические, пневматические (паровые, газовые) высокого давления, воздушные низкого давления (вентиляторные), комбинированные и акустические.

Вторым важным признаком классификации форсунок служит способ регулирования производительности. Классификация форсунок по двум указанным признакам приведена в таблице 3.1.

К механическим форсункам относятся форсунки, в которых жидкость, проходя под давлением через небольшие отверстия, приобретает значительную скорость и подвергается распылу без участия постороннего распылителя.

Таблица 3.1 – Классификация форсунок для распыливания жидкости

Класс	По принципу распыла	По способу регулирования производительности
1	2	3
1	Механические форсунки (рисунок 3.4): - прямотруйные; - вихревые или центробежные.	- с регулированием давления жидкости; - с регулированием сечения выходных отверстий для жидкости; - с отливом или перепуском жидкости.



Продолжение таблицы 3.1

1	2	3
2	Пневматические форсунки высокого давления (воздушные, паровые, газовые, рисунок 3.5): <ul style="list-style-type: none"> <li>- прямоструйные;</li> <li>- вихревые;</li> <li>- многоструйные с периферийной или центральной подачей жидкости.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- с регулированием давления жидкости;</li> <li>- с регулированием сечения для выхода жидкости при постоянном ее давлении</li> </ul>
3	Пневматические форсунки низкого давления (вентиляторные, рисунок 3.6): <ul style="list-style-type: none"> <li>- встречных потоков;</li> <li>- вихревые;</li> <li>- многоструйные с периферийной или центральной подачей жидкости</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- с регулированием давления жидкости и воздуха при постоянном сечении сопл;</li> <li>- с регулированием выходного сечения для воздуха;</li> <li>- с регулированием выходного сечения для жидкости и воздуха</li> </ul>
4	Комбинированные форсунки: паровоздушные; паромеханические; воздушно-механические; вращающиеся (ротационные)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- с регулированием давления жидкости;</li> <li>- с регулированием выходного сечения для жидкости</li> </ul>

Продолжение таблицы 3.1

1	2	3
5	- акустические; - ультразвуковые	то же

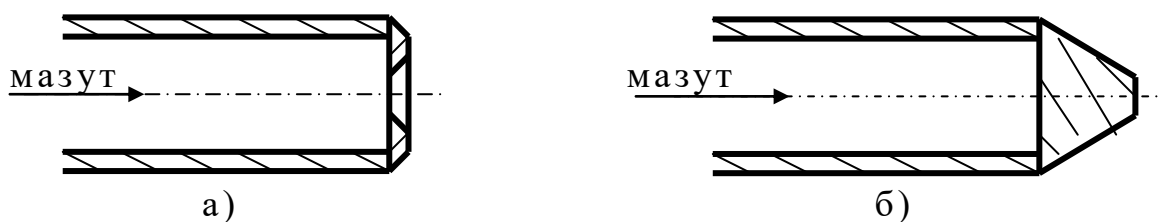
Основные конструкции форсунок, применяемых в промышленности, представлены в приложении А. Рассмотрим более подробно свойства форсунок. Простая механическая форсунка представлена на рисунке 3.4.

Для получения достаточной тонины распыливания жидкость к механическим форсункам должна подаваться под высоким давлением – к центробежным и вихревым под давлением 0.5-0.35 МПа, а к прямоструйным еще более высоким (например, в дизелях топливо подают под давлением свыше 10 МПа).

Прямоструйные форсунки из-за малого корневого угла и большой дальнобойности факела нашли ограниченное применение в технике – в поршневых двигателях внутреннего сгорания, в противопожарных устройствах и др.

Центробежные механические форсунки имеют широкое распространение в народном хозяйстве.

### 1 Механические



а – брандспойная; б – вихревая.

Рисунок 3.4 – Схема механической форсунки

Основными преимуществами механических центробежных форсунок являются:

- высокая экономичность распыливания т.е. расход энергии

на подачу жидкости под высоким давлением во много раз меньше расхода энергии на получение сжатого воздуха или расхода эквивалентного количества топлива на получение пара для пневматических (паровых) форсунок высокого давления. Затраты энергии на распыл также меньше, чем у пневматических форсунок низкого давления;

- компактность и дешевизна форсунок. Удобства их компоновки на огнетехнических агрегатах и технических аппаратах вследствие отсутствия трубопроводов для подвода распылителя;
- удобства комбинирования мазутных форсунок с пылеугольными и газовыми горелками;
- бесшумная работа;
- простота подбора угла раскрытия факела.

Механическим форсункам свойственны следующие недостатки: более грубый распыл жидкости; необходимость более тонкой фильтрации жидкости из-за большой вероятности засорения и закоксовывания отверстий (сопел), особенно у форсунок малой производительности; невозможность создания форсунок малой производительности (на 1-10 кг/час) для жидкости, содержащей механические примеси (например, для мазута); необходимость более высокого подогрева вязких жидкостей перед их распыливанием; угрубление распыла при регулировании производительности дросселированием.

Механические форсунки нашли применение в топках паровых котлов, камерах сгорания газотурбинных и жидкостных реактивных двигателей. Центробежные механические форсунки применяют для распыливания различного рода жидкостей в технологических аппаратах (в камерах распы-

лительных сушилок, в безнасадочных скрубберах для охлаждения очистки, осушки или увлажнения газов, в абсорбционных колоннах, в установках для термического обезвреживания сточных вод и т.д.).

**К пневматическим (паровым, газовым) форсункам высокого давления (ПФВД)** относятся такие, в которых распыл жидкости осуществляется при помощи компрессорного воздуха давлением 0,3-0,9 МПа, паром 0,3-2,5 МПа. Или другими газами давлением более 0,3 МПа. Иногда в ПФВД под давлением подается компрессионный воздух или пар в количестве  $1\text{ м}^3/\text{кг}$  мазута для распыления мазута. Недостающее количество воздуха для полного сгорания мазута порядка  $11\text{ м}^3$  подается отдельно через воздушный канал. В ПФВД применяют малые скорости истечения жидкостей (давление жидкостей перед форсункой как правило составляет несколько десятых долей атмосферы и редко превышает 0,2 МПа) и звуковые, сверхзвуковые скорости истечения распылителя. Для обеспечения тонкого распыливания на 1 кг жидкости расходуется 0,3-0,6 кг пара или 0,5-1,0 кг компрессорного воздуха или газа.

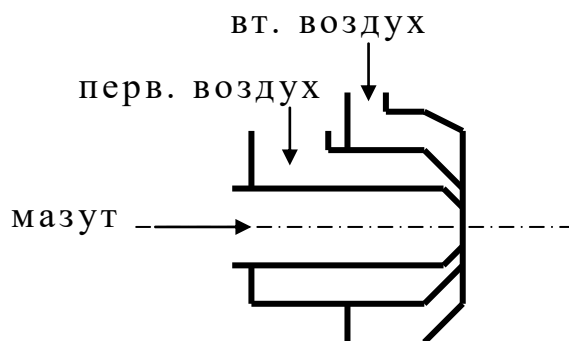


Рисунок 3.5 – Схема пневматической форсунки высокого давления

Преимущества пневматических форсунок высокого давления:

- тонкий распыл жидкости;
- возможность создания форсунок с очень широким диапазоном производительности (от 3 кг в час до 3 тонн в час и более) при небольших размерах;
- широкие пределы регулирования производительности (от 20 до 100%) при сохранении хорошего качества распыливания;
- возможность получения направленного факела (жесткого и настильного);
- меньшая требовательность к фильтрации жидкостей перед распыливанием в сравнении с механическими форсунками вследствие больших проходных сечений для жидкости;
- возможность работы с низконапорными насосами или без них непосредственно с расходных баков, что очень важно при распыле агрессивных жидкостей.

Недостатки пневматических форсунок высокого давления:

- необходимость сооружения компрессорной станции или подвода к агрегатам пара для распыливания, что ограничивает возможности этих форсунок;
- более высокие затраты энергии на распыливание по сравнению с механическими и пневматическими форсунками низкого давления;
- более сложные и громоздкие коммуникации форсунок в связи с необходимостью подвода распылителя;
- высокий уровень шума.

ПФВД (паровые, газовые) нашли широкое применение при сжигании мазута во вращающихся печах производства

стройматериалов, в больших нагревательных печах и др. устройствах, где необходим длинный жесткий факел (марте-новские, сушильные и обжиговые печи). Кроме того их применяют для распыла различных жидкостей в технологических агрегатах (в распылительных сушилках, в реакторах для сжигания серы и фосфора с целью получения  $SO_2$  и  $P_2O_5$ , для распыла сточных вод сильно загрязненных механическими примесями, в установках термического обезвреживания и т.п.).

**К пневматическим форсункам низкого давления, ПФНД (вентиляторным)** относятся такие устройства, в которых распылителем является воздух с давлением от 3000 до 10000 Па. Расход воздуха на распыл одного килограмма жидкости составляет от 4 до 15 кг, что соответствует при сжигании мазута от 25 до 100% всего воздуха, расходуемого на горение. Скорость истечения жидкости измеряется несколькими метрами в секунду, а скорость истечения воздуха, в соответствии с указанным давлением перед форсунками, составляет 70-130 м/с. В ПФНД весь воздух необходимый для сжигания (1кг мазута – 11-12 м<sup>3</sup> воздуха) мазута подается через форсунку.

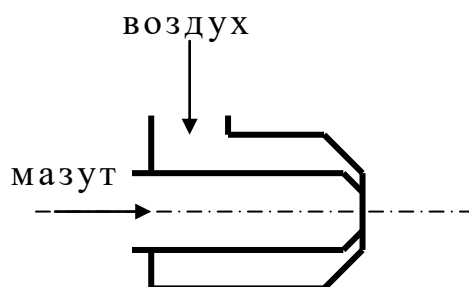


Рисунок 3.6 – Схема пневматической форсунки низкого давления

Преимущества пневматических форсунок низкого давления:

- высокая тонина распыливания вследствие больших удельных расходов распылителя несмотря на низкое его давление;
- более благоприятные условия для сжигания жидкого топлива за счет облегчения смесеобразования при подаче в форсунку всего или значительной части воздуха, что позволяет сжигать топливо при коэффициентах расхода воздуха близких к единице;
- возможность создания форсунок очень малой производительности на 1-2 кг/ч из-за больших проходных сечений для жидкости и распылителя;
- возможность работы с низконапорными насосами или без них, т.е. самотеком из расходных баков.

Недостатки пневматических форсунок низкого давления:

- громоздкость форсунок из-за необходимости пропуска больших объемов распыливающего воздуха;
- необходимость применения вентиляторов высокого давления;
- узкие пределы регулирования производительности у форсунок с постоянным выходным сечением для воздуха.

ПФНД применяют при сжигания мазута в промышленных нагревательных и термических печах, в небольших плавильных печах, в паровых котлах малой мощности.

Комбинированные форсунки позволяют совместить два различных принципа распыливания, что позволяет использовать в одной форсунке преимущества, присущие каждому принципу распыливания в отдельности (рисунок 3.7-3.8).

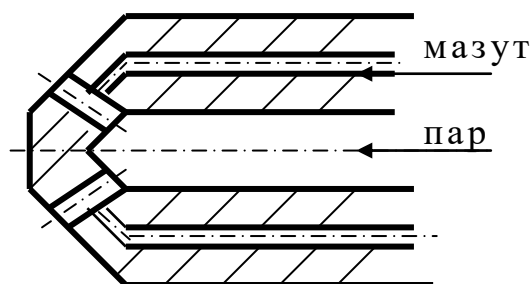


Рисунок 3.7 – Схема паромеханической форсунки

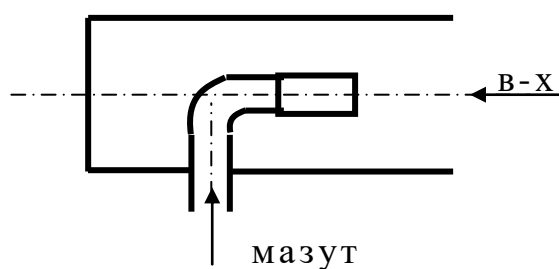


Рисунок 3.8 – Схема воздушно-механической форсунки

Например: комбинация механического распыливания с паровым (воздушным) при очень малых удельных расходах распылителя позволяет получить дешевый распыл при широких пределах регулирования производительности форсунки без ухудшения качества распыливания. При этом однако усложняется конструкция форсунки.

Комбинированные форсунки следует применять для огнетехнических установок и технологических аппаратах, к которым предъявляются повышенные требования в отношении надежности их работы. Кроме того их применяют в камерах сгорания для жидкого топлива, работающих с тепловой нагрузкой, изменяющейся в широких пределах. Например, в камерах сгорания газотурбинных двигателей, в топках паровых котлов и т.д.

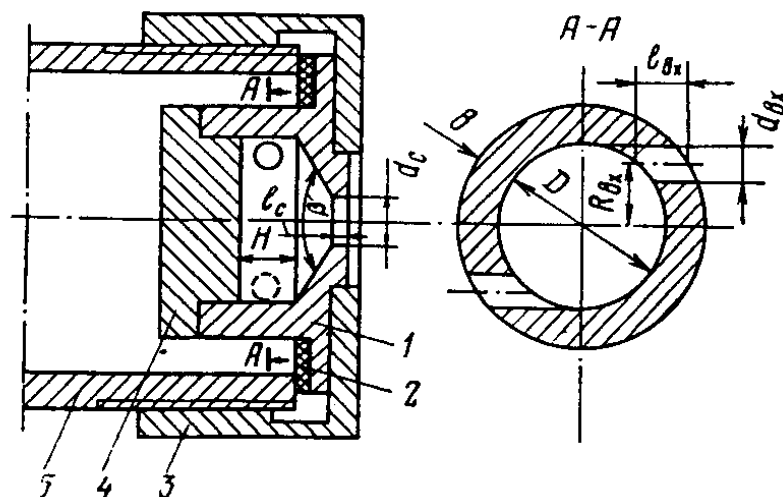


### 3.5 Методики расчета форсуночных устройств

При отоплении различных теплотехнических агрегатов жидким топливом применяют различные виды форсунок (механические, центробежные, пневматические форсунки низкого давления, пневматические форсунки высокого давления и комбинированные). В случае отсутствия на установке вентиляторов высокого давления для сжигания жидкого топлива используют паровые или пневматические форсунки высокого давления вихревого типа.

#### 3.5.1 Расчет центробежных механических форсунок

Расчет центробежных форсунок (рисунок 3.9) для реальной жидкости, теория которой разработана Л.А.Клячко и является дальнейшим развитием теории центробежной форсунки для идеальной жидкости, созданной Г.Н.Абрамовичем.



1 – распылитель; 2 – прокладка; 3 – прижимная головка; 4 – прокладка; 5 – ствол форсунки;  $D_{к.з}$  – внутренний диаметр камеры закручивания

Рисунок 3.9 – Схема механической центробежной форсунки с круглыми тангенциальными входными каналами

Массовый расход жидкости через форсунку, кг/с:

$$G = \pi d_c^2 \cdot \mu \sqrt{2\rho_{\text{ж}}(P_1 - P_{\text{oc}})} / 4 \quad (3.2)$$

где  $\rho_{\text{ж}}$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;

$d_c$  – диаметр сопла форсунки, м;

$\mu$  – коэффициент расхода;

$(P_1 - P_{\text{oc}})$  – перепад давления на форсунке, Па.

Согласно теории центробежной форсунки для идеальных жидкостей коэффициент расхода зависит только от соотношения основных геометрических размеров форсунки.

$$A = \frac{(D_{\text{к.з}} - d_{\text{вх}}) \cdot d_c}{z \cdot d_{\text{вх}}^2} = \frac{B \cdot d_c}{z \cdot d_{\text{вх}}} \quad (3.3)$$

где  $A$  – геометрическая характеристика по Г.Н. Абрамовичу;

$D_{\text{к.з}}$  – диаметр камеры закручивания;

$d_{\text{вх}}$  – диаметр входных каналов;

$d_c$  – диаметр сопла форсунки;

$z$  – число входящих каналов.

Для течения реальной жидкости Л.А. Клячко учел изменение момента количества движения относительно оси форсунки вследствие трения потока о стенки камеры закручивания и вследствие деформации струй на входе в камеру закручивания. Он предложил вместо геометрической характеристики  $A$  использовать эквивалентную характеристику  $A_{\text{эк}}$  (рисунок 3.10):

$$A_{\text{эк}} = \frac{A}{\varepsilon_{\text{д}}} / \left[ 1 + \frac{A \cdot \lambda_{\text{к}}}{2\varepsilon_{\text{д}}} \left( \frac{D_{\text{к.з}} - d_{\text{вх}}}{d_c} - 1 \right) \right] \quad (3.4)$$

где  $\varepsilon_d$  – коэффициент деформации входной струи;  
 $\lambda_k$  – коэффициент трения в камере закручивания.

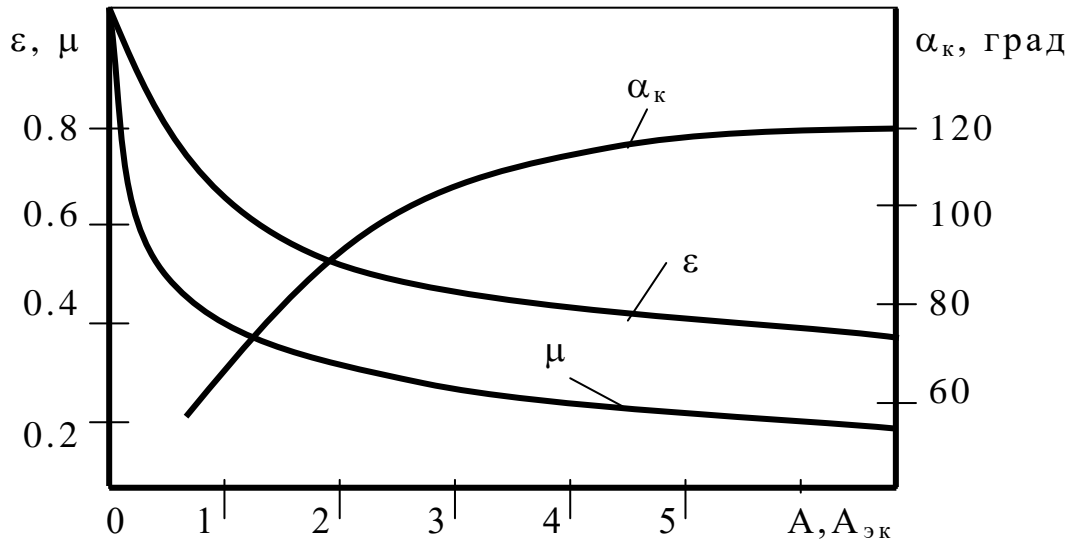


Рисунок 3.10 – Зависимость коэффициента расхода  $\mu$ , коэффициента живого сечения сопла  $\varepsilon$  и среднего корневого угла факела  $\alpha_k$  от геометрической  $A$  и эквивалентной  $A_{эк}$  характеристики форсунки

Расчетная формула для  $\mu$  с введением  $A_{эк}$  имеет такой же вид, как и для идеальной жидкости:

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{A_{эк}^2 / (1 - \varepsilon) + 1 / \varepsilon^2}} \quad (3.5)$$

Коэффициент живого сечения сопла форсунки  $\varepsilon$ , как  $\mu$  зависит только от  $A_{эк}$ :

$$A_{эк} = \frac{\sqrt{2}(1 - \varepsilon)}{\varepsilon\sqrt{\varepsilon}} \quad (3.6)$$

Зависимости (3.5) и (3.6) представлены на рисунке 3.10.

При  $0.75 \leq A_{эк} \leq 7.5$  зависимость для  $\mu$  хорошо аппроксимируется выражением:

$$\mu = 0.44 \cdot A_{\text{эк}}^{-0.65} \quad (3.7)$$

Корневой угол распыла центробежной форсунки может быть определен по формуле, предложенной Л.А. Клячко:

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha_{\text{к}}}{2} = 2\mu \cdot A_{\text{эк}} / \sqrt{(1 + \sqrt{1 - \varepsilon})^2 - 4\mu^2 \cdot A_{\text{эк}}^2} \quad (3.8)$$

Из формулы (3.8) следует, что корневой угол факела центробежной форсунки зависит от  $A_{\text{эк}}$ . При  $1 \leq A_{\text{эк}} \leq 6$  корневой угол может быть определен приближенно по формуле:

$$\alpha_{\text{к}} = 67 \cdot A_{\text{эк}}^{0.28} \quad (3.9)$$

Формулы (3.5) и (3.7) дают более точные результаты для форсунок со строго тангенциальным подводом жидкости в камеру закручивания при длине камеры закручивания  $H \approx d_{\text{вх}}$ .

С увеличением длины камеры закручивания  $H$ , в ее полости возникают вращательно-циркуляционные зоны, уменьшающие момент количества движения основного активного потока, что приводит к увеличению коэффициента расхода, уменьшению корневого угла факела. Поэтому длину камеры закручивания принимают близкой к диаметру входного канала.

Относительная длина сопла  $l_c/d_c$  не влияет на коэффициент расхода, но оказывает влияние на корневой угол факела. С увеличением  $l_c/d_c$  корневой угол уменьшается. Рекомендуется принимать  $l_c/d_c = 0.25 - 0.5$ .

Относительная длина входных каналов  $l_{\text{вх}}/d_{\text{вх}}$  сильно влияет на коэффициент расхода и корневой угол факела. Так, при  $l_{\text{вх}} < 1.5d_{\text{вх}}$  поток на входе в камеру закручивания отклоняется от тангенциального направления и форсунка утрачивает свойства центробежности. При этом  $\mu$  резко уве-

личивается, а корневой угол факела уменьшается. Расчетно-проектная длина и корневой угол  $\alpha_k$  мазутных форсунок приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 - Расчетно-проектная длина и корневой угол  $\alpha_k$  факела мазутных форсунок.

Тип форсунки	Расход мазута, кг/ч	$L_f$ , м	$\alpha_k$ , град
Центробежные механические форсунки	80-2000	1-6	50-120
Ротационные форсунки	5-200	0.5-3.0	30-170
Пневматические форсунки высокого давления:	50-2000	прямоточные	15-30
		вихревые	30-90
Пневматические форсунки низкого давления:	5-700	прямоточные	20-30
		вихревые	60-90

При  $l_{вх} > 2d_{вх}$  коэффициент расхода и корневой угол факела становятся постоянными, не зависящими от  $l_{вх}/d_{вх}$ . Рекомендуется принимать  $l_{вх} = (2-3)d_{вх}$ .

Толщина стенки камеры (b) закручивания связана с длиной канала и другими ее геометрическими размерами следующим соотношением:

$$l_{\text{вх}} = \sqrt{b \cdot D_{\text{к.з}} + b^2 + \frac{d_{\text{вх}} \cdot D_{\text{к.з}}}{2} - \frac{d_{\text{вх}}^2}{4}} - \sqrt{\frac{d_{\text{вх}} \cdot D_{\text{к.з}}}{2 - \frac{d_{\text{вх}}^2}{4}}} \quad (3.10)$$

Формулой (3.10) следует пользоваться в тех случаях, когда  $D_{\text{к.з}} \geq 5d_{\text{вх}}$ . При  $D_{\text{к.з}} < 5d_{\text{вх}}$  толщину стенок камеры закручивания принимают равной  $b = l_{\text{вх}}$ .

Угол конуса на входе в сопло рекомендуется выполнять  $\beta = 90-120^\circ$ . Меньшие значения угла ведут к росту коэффициента расхода и уменьшению корневого угла распыливания и усложнению технологии изготовления форсунки.

Число входных каналов  $z$  при постоянной их суммарной площади не влияет на  $\mu$  и  $\alpha_{\text{к}}$ . Однако, с увеличением числа входных каналов, повышается равномерность распределения капель вокруг оси форсунки, но увеличивается вероятность засорения форсунки при работе на загрязненных жидкостях.

При проектировании форсунок для жидкого топлива ограничиваются 2-4 отверстиями, а для сточных вод – одним – двумя.

Значение параметра  $B$  рекомендуется принимать равным 4-5. При этих значениях потери напора во входных каналах не оказывают существенного влияния на коэффициент расхода. Для рекомендованных значений  $B$  коэффициент деформации входной струи принимаем  $\varepsilon_{\text{д}} = 0.75$  по данным Л.А. Клячко.

Коэффициент трения в камере закручивания  $\lambda_{\text{к}}$  для форсунок с тангенциальным подводом с круглыми входными каналами и короткой камерой закручивания определяют по формулам:

- для ламинарного режима течения жидкости ( $Re_{\text{вх}} < 2.3 \cdot 10^3$ ):

$$\lambda_k = 24.6 / \text{Re}_{\text{вх}}^{0.75} \quad (3.11)$$

- для турбулентного режима течения жидкости ( $\text{Re}_{\text{вх}} > 2.3 \cdot 10^3$ ):

$$\lambda_k = 1.22 / \text{Re}_{\text{вх}}^{0.36} \quad (3.12)$$

Причем критерий Рейнольдса рассчитывают для условий течения жидкости во входных каналах:

$$\text{Re}_{\text{вх}} = W_{\text{вх}} d / \nu$$

где  $W_{\text{вх}}$  – скорость жидкости во входных каналах, м/с;

$\nu$  – коэффициент кинематической вязкости жидкости, м<sup>2</sup>/с;

$d$  – характерный размер принимаемый равным диаметру отверстия, площадь которого равна суммарной площади входных каналов, м, т.е.  $d = d_{\text{вх}} \sqrt{z}$ .

Исходными данными для гидравлического расчета форсунок обычно являются корневой угол факела, секундный расход жидкости, давление жидкости перед форсункой, плотность и коэффициент вязкости жидкости. Задача расчета состоит в определении размеров сопла, камеры закручивания и входных каналов, обеспечивающих необходимый расход жидкости и корневой угол факела.

Расчет выполняют в следующем порядке:

1. По формуле (3.9) или по графику на рисунке 3.10 для заданного корневого угла факела определяют необходимое значение эквивалентной характеристики форсунки  $A_{\text{эк}}$ ;
2. Зная  $A_{\text{эк}}$  по формуле (3.7) или по графику на рисунке 3.10 определяют коэффициент расхода форсунки  $\mu$ ;
3. Используя формулу (3.2) рассчитывают диаметр сопла форсунки:

$$d_c = \sqrt{\frac{4G}{n \cdot \mu \sqrt{2\rho_{ж}} (P_1 - P_{o.c})}}$$

4. В соответствии с изложенными рекомендациями принимают значение параметра  $B$ , коэффициента  $\varepsilon_d$ , число входных каналов  $z$ . Предварительно задавшись числом  $Re_{вх}$  по формулам (3.11-3.12) определяют коэффициент трения в камере закручивания  $\lambda_k$ , затем используя формулу (3.4) вычисляют геометрическую характеристику форсунки:

$$A = \frac{A_{эк} \cdot \varepsilon_d}{1 + A_{эк} (B \cdot d_{вх} / d_c - 1) \cdot \frac{\lambda_k}{2}}$$

5. Зная  $A$  из выражения (3.3) определяют необходимый диаметр входных каналов:

$$d_{вх} = B \cdot d_c / z \cdot A$$

6. По полученному значению  $d_{вх}$  определяют скорость жидкости и число  $Re_{вх}$  во входных каналах. При существенном отличии полученного значения  $Re_{вх}$  от предварительно принятого выполняют уточняющий расчет по новому значению  $Re_{вх}$ ;

7. Определяют внутренний диаметр камеры закручивания, рассчитывая по соотношению:  $D_{к.з} = d_{вх} (B + 1)$

8. Выбор остальных размеров форсунки:  $L_{вх} = (2 - 2.5) d_{вх}$

Если  $\frac{d_{вх}}{D_{к.з}} > 0.2 \rightarrow b_{к.з} \approx l_{вх} = (2 - 2.5) d_{вх}$  и  $\frac{d_{вх}}{D_{к.з}} < 0.2 \rightarrow b_{к.з} = f(D_{к.з}, d_{вх})$

$L_{к.з} \approx d_{вх}$ , обычно  $L_{к.з} = 1.2 d_{вх}$ ,  $\varphi = 90 - 120^\circ$  (лучше иметь  $120^\circ$ ),

$$l_c = (0.1 - 0.2) d_c, D_{ст} \geq D_{к.з} + 2b_{к.з} + 2d_{вх}$$

**Определение максимального диаметра капель.** Толщину жидкой пленки  $\delta$  определяем по выражению:



$$\delta = d_c \left( 1 - \sqrt{1 - \mu \cdot \cos \frac{\alpha_k}{2} / 2 \cos \frac{\alpha_k}{2}} \right), \text{ мм} \quad (3.13)$$

где  $\mu$  - коэффициент динамической вязкости жидкости.

Начальная скорость истечения жидкости из форсунки:

$$W_{ж} = G / \rho \cdot f_n \quad (3.14)$$

где  $f_n$  - площадь сечения жидкой пелены толщиной  $\delta$  или площадь боковой поверхности усеченного конуса с образующей  $\delta$ , которая определяется по формуле:

$$f_n = \Pi \delta (d_c - \delta \cdot \cos \frac{\alpha_k}{2}) \quad (3.15)$$

Скорость истечения пелены:

$$W_n = \frac{4G}{\pi d_c^2 \cdot \rho_{ж}} \sqrt{A_{эк}^2 + \frac{1}{\varepsilon^2}} \quad (3.16)$$

где  $\varepsilon$  - коэффициент живого сечения сопла, определяемый по графику на рисунке 3.10.

Можно определить толщину пелены на выходе из форсунки по формуле справедливой для  $A_{эк} = 1.5 - 4.7$ :

$$\delta = \frac{0.17 d_c}{A_{эк}^{1.09}} \quad (3.17)$$

Для механических центробежных форсунок с круглым тангенциальным входным каналом. Максимальный диаметр капель связан со средним медианным диаметром следующим соотношением:  $d_{мак} = d_m \sqrt[3]{8.55} = 2.05 d_m$  (3.18)

Так, для мазута  $\delta / d_m = 0,00525 \text{Re}^{0.6} \cdot (\mu_{ж} / \mu_{г})^{0.2}$

где  $\mu_{ж} / \mu_{г}$  - отношение динамических вязкостей жидкости и окружающей среды ( $\text{Re} = 300 - 1000$ ,  $\mu_{ж} / \mu_{г} = 730 - 920$ )

### 3.5.2 Расчет прямооточных пневматических форсунок низкого давления (ПФНД)

Расчет таких форсунок сводится к определению проходных сечений для жидкости и воздуха и гидравлических сопротивлений воздушного канала и жидкостной трубки.

Скорости истечения жидкости из сопел невелики и обычно не превышают 4-5 м/с. скорость истечения и расход жидкости определяют, применяя формулу истечения для несжимаемой жидкости:

$$W = \varphi \sqrt{2(P_1 - P_{oc}) / \rho_{ж}} \quad (3.19)$$

$$G = \mu \cdot f_c \sqrt{2\rho_{ж} (P_1 - P_{oc})} \quad (3.20)$$

где  $\varphi$  - коэффициент скорости,  $\rho_{ж}$  - плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>,  $(P_1 - P_{oc})$  - перепад давления на сопле, Па,  $\mu$  - коэффициент расхода,  $f_c$  - площадь сечения сопла, м<sup>2</sup>.

При заданном значении расхода жидкости и ее начальном давлении определяют площадь сечения сопла. Значение коэффициентов  $\varphi$  и  $\mu$  зависит от формы сопла и числа Рейнольдса.

При числах Рейнольдса  $Re > 2000$  в форсунках с цилиндрическими соплами  $\varphi = \mu = 0.98$ , для суживающихся конических сопел с центральным углом  $\beta$  от 13 до 30°  $\mu = 0.9 - 0.95$ ,  $\varphi = 0.96 - 0.975$ . При истечении вязких жидкостей число  $Re < 2000$ , при определении коэффициента расхода необходимо учитывать вязкость. Для мазута  $\mu = 0.2 - 0.4$ .

В ПФНД перепад давления воздуха в сопле не превышает 10000 Па, что соответствует скорости истечения холодного воздуха около 70 м/с, позволяющей получить удов-

летворительное качество распыливания топлива. Для обеспечения диапазона регулирования тепловой мощности в пределах 75-100% необходим минимальный перепад давления воздуха на сопле около 5000 Па. Расчет воздушного канала приведен в подразделе 1.6.1.

Скорости в маловязких капельных жидкостях в трубопроводах принимают в пределах 0,5-2 м/с, а вязких (мазут) 0,1-0,8 м/с. С целью предотвращения засорения трубопроводов диаметр должен быть не менее 10 мм, а каналы распылителей не менее 1,5 мм. При проектировании трубопроводов для жидкостей, загрязненных механическими примесями, во избежание выпадания примесей в трубопроводах в расчетах, принимают более высокие скорости вязких жидкостей - 1-2 м/с.

При подогреве мазута возможно выпадение примесей в трубопроводах (коксование). Во избежание коксования рекомендуется увеличивать скорость движения жидкости в форсунках до 3-4 м/с.

Выбор расхода воздуха для ПФНД. Возможны два варианта:

- весь воздух, необходимый для горения, вводится в форсунку ( $\approx 12-13 \text{ м}^3/\text{кг}$  мазута);
- минимальный расход воздуха ( $\approx 4 \text{ м}^3/\text{кг}$  мазута), остальной необходимый для полного сгорания мазута вводят в виде вторичного воздуха с меньшим давлением.

### **3.5.3 Расчет паровых и пневматических форсунок высокого давления вихревого типа (ПФВД)**

Исходными данными являются: расход жидкости, кг/с; параметры распыливающего агента,  $t$ ,  $P$ ,  $\rho$ ; удельный расход

распылителя, корневой угол факела. Определить геометрические размеры форсунки.

По конструкции она аналогична механической центробежной, с той разницей, что в камеру закручивания подается не жидкость, а поток распылителя (пар или компрессорный воздух). Жидкость вводят по трубке, размещенной по оси камеры закручивания (рисунок 3.11).

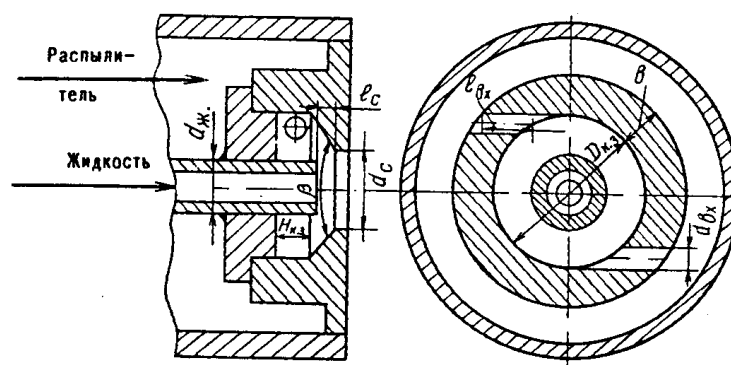


Рисунок 3.11 – Схема пневматической (паровой) форсунки вихревого типа

Для расчета основных размеров используем методику расчета центробежной форсунки для идеальной жидкости. Однако при этом необходимо учитывать сжимаемость распыливающего агента, что обеспечивается использованием геометрической характеристики форсунки с поправкой:

$$A_p = A \frac{\rho_1}{\rho_0} \quad (3.21)$$

где  $A$  – геометрическая характеристика форсунки по Г.Н. Абрамовичу, формула (3.3);

$\rho_0$  и  $\rho_1$  – плотность распыливающего агента соответственно до форсунки и на выходе из нее,  $\text{кг/м}^3$ .

Плотность распыливающего агента определяют по давлению и температуре. Температуру потока распылителя на выходе из форсунки рассчитывают по формуле:

$$T_{\Gamma_1} = T_{\Gamma_0} \cdot \left( \frac{P_{\Gamma_1}}{P_{\Gamma_0}} \right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (3.22)$$

где  $T_{\Gamma_1}$ ,  $T_{\Gamma_0}$  – температура газа соответственно до и за газовыпускными отверстиями, К;  $P_{\Gamma_0}$ ,  $P_{\Gamma_1} = P_{в.ст}$  – абсолютное статическое давление газа до газовыпускных отверстий и за ними, Па;  $k$  – показатель адиабаты.

Зная  $A_p$ , находят коэффициент расхода форсунки  $\mu$  (по рисунку 3.10).

Расход распыливающего агента, кг/с, через форсунку определяют по формулам истечения сжимаемой жидкости:

- при давлении распыливающего агента менее критического,

$$\text{т.е. } \frac{P_1}{P_0} > \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} :$$

$$G = \mu \cdot f_c \sqrt{\frac{2k}{k-1} \left[ \left( \frac{P_1}{P_0} \right)^{\frac{2}{k}} - \left( \frac{P_1}{P_0} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right] \cdot \frac{P_0}{V_0}} \quad (3.23)$$

- при давлении распыливающего агента выше критического:

$$G = \mu \cdot f_c \sqrt{\frac{2k}{k-1} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k-1}} \frac{P_0}{V_0}} \quad (3.24)$$

где  $f_c$  – площадь сопла для распылителя, м<sup>2</sup>;  $P_0$  и  $P_1$  – абсолютное давление распыливающего агента соответственно перед форсункой и на выходе из нее, Па;  $V_0$  – удельный объем распыливающего агента перед форсункой, кг/м<sup>3</sup>.

Наружный диаметр жидкостной трубки (см. рис 3.1) не должен быть больше диаметра воздушного вихря, который для центробежных форсунок составляет:

$$d_e = d_c \sqrt{1 - \varepsilon} \quad (3.25)$$

где  $d_c$  – диаметр сопла форсунки;  $d_v$  – диаметр воздушного вихря;  $\varepsilon$  – коэффициент живого сечения сопла форсунки, определяемый по графику на рисунке 3.10.

Удельный расход распыливающего агента можно принять равным 0.15 кг/кг.

### **3.6 Термическая переработка жидкого топлива**

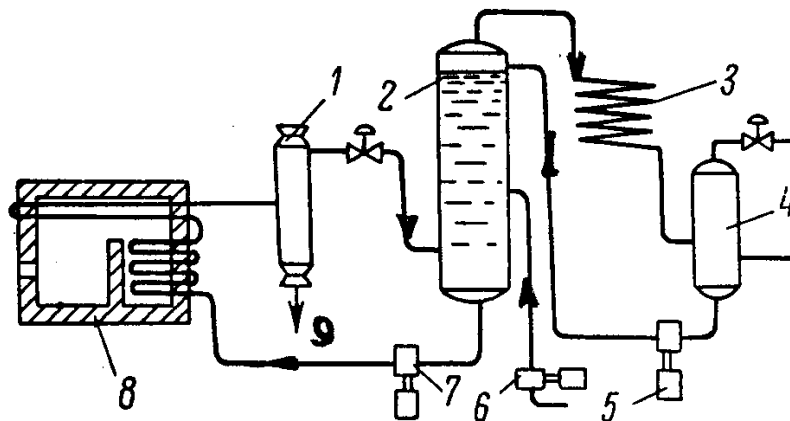
В промышленности широкое распространение получили два вида переработки жидкого топлива: крекинг и пиролиз. Рассмотрим более подробно каждый из них.

#### **3.6.1 Термический крекинг жидкого топлива**

В настоящее время огромное количество тяжелых нефтепродуктов подвергаются термической переработке (крекингу) с целью получения из них бензина и других легких продуктов. Процесс крекинга протекает без доступа воздуха за счет воздействия на исходный продукт высокой температуры и давления (термический крекинг). При наличии специальных катализаторов тот же процесс протекает при давлениях близких к атмосферному. Сущность этого процесса заключается в расщеплении и перестройке молекул углеводородов с образованием значительного количества более легких молекул различных углеводородных соединений, образующих как легкие, так и газовые фракции. Крекинг – газы являются побочными продуктами производства и представляют собой сложную смесь углеводородов различных гомологических рядов водорода, окиси углерода, а также балластных газов.

Различают две формы термического крекинга: жидкофазный и парофазный.

Жидкофазный крекинг протекает при температуре 450-520<sup>0</sup>С и давлениях от 12 до 70 бар (1.2-7.0 МПа). Температура нагрева продукта при парофазном крекинге может быть в пределах 550-650<sup>0</sup>С при том же давлении. Выход бензина при жидкофазном крекинге заметно больше чем при парофазном, но качество его (октановое число) значительно ниже. Выход газа выше при парофазном крекинге достигает 200-250 м<sup>3</sup> на 1 тонну перерабатываемого сырья, а при жидкофазном крекинге составляет 40-60 м<sup>3</sup>/т. Схема термического крекинга приведена на рисунке 3.12.



1 – колонна; 2 – разделительная колонна; 3 – конденсатор; 4 – сепаратор; 5 – слив бензина; 6,7 – насосы; 8 – трубчатая печь; 9 – слив мазута.

Рисунок 3.12 – Схема термического крекинга

Исходный продукт в жидкофазном крекинге подается в разделительную колонну 2, где нагревается теплом продуктов, поступающих из колонны 1. Вся смесь направляется в трубчатую печь 8, откуда при высокой температуре поступает в колонну 1, где происходит ее расщепление. Из нижней части колонны удаляются остатки (мазут), а парообразные продукты снова поступают по отдельности в колонну 2. Из

колонны наиболее легкие фракции уходят в конденсатор 3, а оставшиеся жидкие продукты смешиваются со свежим полупродуктом и возвращаются в печь. Парогазовая смесь после конденсатора поступает в сепаратор 4, где происходит отделение газа от бензина. Часть бензина возвращается в колонну, а газы после улавливания ценных для химической промышленности компонентов используются в качестве топлива.

Схема парофазного крекинга отличается от схемы жидкофазного тем, что в парообразные углеводороды добавляются жидкие продукты, которые также испаряются за счет избыточной теплоты перегретого пара.

Каталитический крекинг протекает в реакционной колонне, в которой пар пропускают через слой катализатора, причем процесс идет при давлении близком к атмосферному. Выход газов такой же, как и для жидкофазного, т.е. 40-60 м<sup>3</sup> на тонну сырого продукта.

### **3.6.2 Пиролиз жидкого топлива**

Процесс пиролиза протекает при температурах более высоких, чем при крекинге, в интервале 670-820<sup>0</sup>С при давлениях близких к атмосферному. Целью процесса является получение непредельных углеводородов: бензола, толуола и др., представляющих ценное сырье для химической промышленности, используемых как добавки к бензинам для повышения их качества.

Сырьем пиролиза могут служить любые нефтепродукты, однако чаще всего используются керосин, пропанобутановые фракции и мазут. Выход пиролизного газа весьма велик 450-



550м<sup>3</sup> на тонну перерабатываемого сырья. В состав газа входят метан, этан, этилен, водород и др.  $Q_H^p=43.0-48.0\text{МДж/м}^3$ .

Процесс пиролиза осуществляется следующим образом. Сырье насосом подается в трубчатую печь, аналогичную печам, применяемым при крекинге. После отделения в специальном сепараторе жидкой фазы пары направляются в газогенератор (пиролизер), где подвергаются пирогенетическому расщеплению. Потом в специальной аппаратуре производится промывка, фракционирование, конденсация легкокопящих углеводородов и отделение газа. После улавливания из газа наиболее ценных компонентов он может быть использован в качестве промышленного или бытового топлива. Составы газов нефтепереработки представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Составы газов нефтепереработки, %

Газ	Формула	Способ получения			
		крекинг			Пиролиз при 700°С
		Жидко- фазный	Паро- фазный	Катали- тический	
Водород	H <sub>2</sub>	3,0	9,0	5,4	0,4
Метан	CH <sub>4</sub>	30,0	28,0	9,9	10,2
Этан	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	17,0	14,0	6,1	1,4
Пропан	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	10,0	3,0	20,8	1,9
Бутан	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	5,0	1,0	46,2	0,5
Этилен	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	2,0	20,0	-	16,2
Пропилен	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	5,0	15,0	6,1	13,4
Бутилен	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	5,0	10,0	5,5	5,3

## 4 СЖИГАНИЕ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА

Твердое топливо в виде кусков хорошо сгорает в слоевом процессе. При уменьшении размеров кусков топлива появляются затруднения в виде быстрого роста аэродинамического сопротивления слоя. При прохождении воздуха через слой мелкозернистого топлива требуется большое давление воздушного дутья. В этих условиях мелкие зерна топлива выдуваются и уносятся воздушным потоком. Допустимая интенсивность дутья, а следовательно и сжигания, очень мала. Зерна диаметром 6-9мм и менее практически уже невозможно сжечь в виде неподвижного слоя, так как увеличение дутья приводит к тому, что зерна легко приходят во взвешенное состояние. Изучение этого явления показало, что процесс горения частиц топлива в полете даже улучшается, т.к. частица имеет всесторонний контакт с газовой средой и омывается потоком воздуха по всей поверхности. Кроме того с уменьшением диаметра зерен топлива суммарная поверхность реакции значительно возрастает.

Таким образом, образовался новый весьма эффективный способ сжигания твердого порошкообразного топлива в воздушном потоке. В настоящее время известны следующие варианты этого способа: сжигание в вихревом потоке – в циклонных топках, сжигание в кипящем слое, сжигание пылевидного топлива в факеле.

В промышленности широко применяется процесс сжигания пылевидного топлива в факеле.

### 4.1 Сжигание пылевидного топлива в факеле

Затруднения при сжигании угольной мелочи устраняют

или брикетированием или превращением мелочи в пыль, которая успешно сжигается во взвешенном состоянии. Пыль имеет очень большую поверхность контакта с воздухом, что обеспечивает высокую интенсивность и полноту сгорания топлива. Сгорание пылинок облегчается при наличии в угле большого количества летучих, которые, выделяясь при нагревании пылинки, легко воспламеняются и быстро сгорают как газообразные топлива. После этого остается пористая частица кокса, догорание которой происходит быстрее, чем плотной пылинки. В связи с этим, чем меньше летучих в топливе, тем тоньше должна быть пыль. Самая тонкая пыль требуется при сжигании антрацита. Для сжигания в пылевидном состоянии пригодны все виды каменных углей и горючих сланцев. Высокое содержание золы (примерно 50%) хотя и является весьма нежелательным, но не является большим препятствием при сжигании пыли.

#### **4.1.1 Основы пылеприготовления и физические свойства угольной пыли**

Для превращения крупных кусков влажного топлива в сухую пыль, пригодную для сжигания, твердое топливо предварительно подвергается дроблению, сушке и размолу.

Перед подачей в углеразмольное устройство топливо проходит следующую подготовку:

1. Магнитную сепарацию, т.е. извлечение из угля металлических предметов.
2. Удаление древесной щепы (из щепы при размолу получается древесная вата препятствующая транспорту пыли).
3. Сушка до содержания влаги 4-6%.

4. Грохочение через сито размером 10-15мм.
5. Дробление крупных кусков до размером 10-15мм.
6. Окончательная сушка до 0.5%.
7. Помол на пыль.

Угольная пыль – полидисперсный порошок с размерами частиц от 10 до 500 мкм.

**Характеристика пыли.** Пыль характеризуется следующими физическими свойствами.

1. Плотность  $\rho$  (кг/м<sup>3</sup>).

Различают насыпную, кажущуюся и истинную плотность.

$$\rho_{нас} = \frac{G}{V_{нас}}; \quad \rho_{каж} = \frac{G}{V_{каж}}; \quad \rho_{ист} = \frac{G}{V_{т.в.час}}$$

где  $G$  – масса пыли, кг;

$V_{нас}$  – объем насыпной;

$V_{каж} = V_{пар} + V_{т.в.час} + V_{в-х \text{ между ч-ц}}$ ,  $\rho_{нас} < \rho_{каж} < \rho_{ист}$

Насыпную плотность используют при расчете емкостей бункеров и пылепитателей. Кажущуюся плотность используют при расчете циклонов, сепараторов, пневмотранспорта и для определения удельных поверхностей угольной пыли. Насыпная плотность свежеприготовленной пыли составляет 500 - 700 кг/м<sup>3</sup>, слегка слежавшаяся 800 - 900 кг/м<sup>3</sup>, слежавшаяся пыль 1300-1500 кг/м<sup>3</sup>. Угольная пыль энергично абсорбирует воздух на своей поверхности. Она не выдерживает сосредоточенной нагрузки. В бункере с угольной пылью можно утонуть.

2. Удельная поверхность является важной характеристикой дисперсности пыли и представляет собой суммарную поверхность одного килограмма угольной пыли,  $F = \text{м}^2/\text{кг}$ .

В зависимости от крупности помола площадь колеблет-

ся от 300-2000 м<sup>2</sup> и определяется по следующему выражению:

$$F = \frac{6}{\rho \cdot d}$$

где  $\rho$  - плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $d$  – диаметр пылинок, м.

Все пылинки в этой формуле имеют форму шара и один размер (монодисперсная пыль).

3. Влажность. Чем меньше влажность, тем легче пыль воспламеняется, тем лучше и легче протекает процесс горения. Слишком сухая пыль приводит к самовоспламенению.

4. Взрываемость угольной пыли. Угольная пыль обладает свойством образовывать с воздухом взрывоопасные смеси. Наиболее взрывоопасные частицы топливной пыли с размерами: торф и сланец < 0.2 мм; бурый уголь < 0.15 мм; каменный уголь < 0.12 мм.

Взрыв пыли происходит в результате воспламенения летучих веществ, выделяющихся из топлива при нагреве. Существует предельно низкая концентрация кислорода в воздухе, при которой угольная пыль не может взрываться, в зависимости от вида топлива, %: торф и сланец – 16; бурый уголь – 18; каменный уголь – 19.

Для предотвращения взрыва угольной пыли при сушке и транспортировке в воздух добавляют водяной пар. Взрываемость зависит от количества летучих веществ. Чем тоньше помол, тем быстрее нагрев, тем большая вероятность взрыва. Взрывоопасная концентрация пыли различных углей в воздухе составляет, кг/м<sup>3</sup>: торф 13 – 16; бурый уголь 5-6; каменный уголь 3 - 4.

5. Транспортные свойства пыли. Угольная с воздухом или продуктами горения образует хорошо подвижную эмульсию, которая обладает свойством легко перекачиваться по трубопроводу, т.к. в свежеразмолотой пыли 50-65% объема занимает воздух, что придает ей большую текучесть, позволяющую легко транспортировать на большие расстояния (1-2 км). Перекачка осуществляется при соотношении от 1 до 35 кг пыли на кг воздуха, при давлении воздуха 0.5 – 1.0 МПа.

На размол затрачивают большое количество энергии, поэтому всегда необходимо учитывать экономическую сторону размола топлива. Чем грубее помол тем меньше затраты (рисунок 4.1).

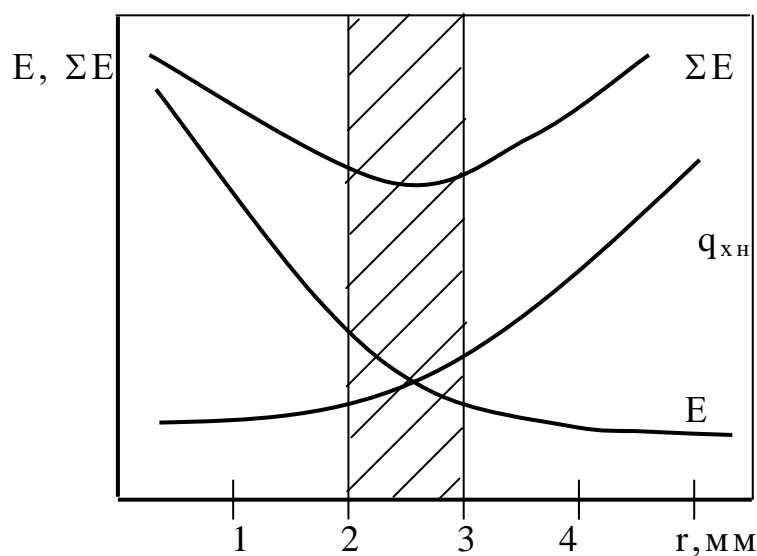


Рисунок 4.1 – Экономическая тонкость размола

Экономической тонкостью размола твердого топлива называется величина размера частицы пыли  $r_{\text{эф}}$ , при которой суммарные затраты энергии на размол топлива и обслуживания установки с одной стороны, а затраты на потерю топлива с механическим недожогом с другой стороны будут минимальны.

На величину экономичной тонкости размолва влияет:

1. Выход летучих.

Чем больше летучих, тем крупнее помол и тем меньше затраты.

2. Полидисперность.

Чем более равномерный состав пыли, тем крупнее помол.

3. Конструкция топки и горелочных устройств.

Чем совершеннее конструкция топки, аэродинамика, тем крупнее помол.

#### **4.2 Кинетический и диффузионный режим горения угольных частиц**

Горение топлива – сложный химико-физический процесс, зависящий как от кинетических характеристик, так и от физических факторов подвода окислителя к поверхности твердого или жидкого топлива или к молекулу газа. Тогда процесс определяется равенством скорости химической реакции  $q_k$  и потоком окислителя  $q_R$ . Скорость химической реакции  $q_k$  пропорциональна константе  $K$  и концентрации кислорода на поверхности частицы топлива  $C_R$ :

$$q_k = K C_R \quad (4.1)$$

Диффузионный поток окислителя по аналогии с процессом теплообмена пропорционален коэффициенту диффузионного массообмена,  $\alpha_d$  и разности концентрации вдали от частицы  $C$  и на поверхности  $C_R$ :

$$q_d = \alpha_d (C - C_R) \quad (4.2)$$

Можно ввести понятие о некоторой эффективной константе  $K_{\text{эф}}$ , которая с учетом концентрации  $C$  обусловит тот

же поток:

$$K_{эф}C = KC_R$$

Из уравнений (4.1-4.2) получается связь между величинами  $K_{эф}$ ,  $K$ ,  $\alpha_d$ :

$$K_{эф} = \frac{1}{\left(\frac{1}{K} + \frac{1}{\alpha_d}\right)} \quad (4.3)$$

где  $\alpha_d$  – определяется по уравнению:

$$\alpha_d = Nu_d D / \delta$$

где  $Nu_d$  – диффузионный критерий Нуссельта;  $D$  – коэффициент диффузии,  $m^2/c$ ;  $\delta$  – диаметр частицы, м.

Теоретически и экспериментально получено, что для мелких частиц в условиях молекулярной диффузии  $Nu_d = 2$ . Коэффициент диффузии зависит от температуры по соотношению:

$$D = D_0 \left( \frac{T_g}{273} \right)^n$$

где  $D_0 = (0,16-0,19) \cdot 10^{-4}$ ,  $m^2/c$ ;  $n = 1,5-2,0$ ;  $T_g$  – температура газа, К.

Из равенства  $q_k$  и  $q_R$  определяется значение концентрации кислорода на поверхности:

$$C_R = \frac{C}{\left(1 + \frac{K}{\alpha_d}\right)}$$

Если известна скорость реакции, то можно определить количество теплоты, выделяющейся вследствие химической реакции:

$$Q_p = Q_{н^P} \cdot \beta \cdot C \cdot K_{эф} \quad (4.4)$$

где  $Q_{н^P}$  – теплота сгорания топлива, кДж/кг;



$\beta$  - стехиометрический коэффициент, который представляет собой отношение массы прореагировавшего топлива к массе израсходованного кислорода. Количество теплоты обусловленное кинетикой  $Q_{p.k} = Q \cdot \beta \cdot C \cdot K$ , диффузией  $Q_{p.d} = Q \cdot \beta \cdot C \cdot \alpha_d$  и эффективное тепловыделение (уравнение 4.4) для различных размеров частиц. При этом возможны следующие случаи:

1. При низкой температуре  $K \ll \alpha_d$ , тогда  $K_{эф} \approx K$  и  $Q_{p.k} \approx Q_p$ . Этот режим определяется химической кинетикой и носит название кинетического.
2. При высоких температурах  $\alpha_d \ll K$ . Тогда  $K_{эф} \approx \alpha_d$  и  $Q_p \approx Q_{p.d}$ . Этот режим лимитируется диффузией кислорода к поверхности топлива и называют диффузионным. Из уравнения 4.4 следует, что при кинетическом  $C_R \approx C$ , а при диффузионном  $C_R \approx 0$ .

Для интенсификации воспламенения мелких частиц, реагирующих в кинетическом режиме, необходимо повышать температурный уровень процесса за счет посторонних источников теплоты или за счет повышения концентрации частиц в газе, которые своей массой будут прогревать газ, способствуя процессу воспламенения частиц.

Это учитывается следующим уравнением:

$$c_g \cdot \rho_g \frac{dT}{d\tau} = \mu \cdot f \cdot \alpha_g (T_q - T_g)$$

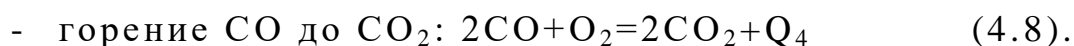
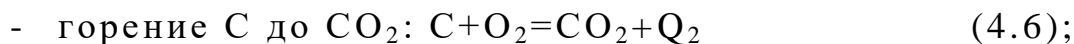
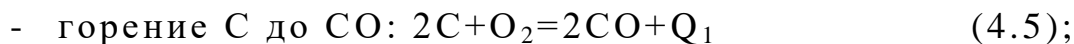
где  $c_g$  – теплоемкость газа, Дж/кг·К;

$\rho_g$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;

$\mu$  - концентрация частиц топлива в пыли, кг/м<sup>3</sup>.

### 4.3 Горение угольных частиц в факеле

Процесс горения угольных частиц зависит от динамики изменения температур и концентраций окислителя и продуктов сгорания и протекает по следующим реакциям:



Первые две реакции называются первичными, последние вторичными. Реакции горения 4.5, 4.6 и восстановления 4.7 являются гетерогенными и протекают на поверхности твердого топлива, реакция горения окиси углерода 4.8 – гомогенная и происходит в газовом объеме, окружающем частицу твердого топлива.

Для мелкой частицы, реагирующей в кинетическом режиме, характерное полное проникновение кислорода внутрь частицы. Для крупной наблюдается вследствие диффузионного режима кислорода т.е. малое значение  $C_R$  и слабое проникновение его внутрь частицы. С целью интенсификации и использования внутренней поверхности крупных частиц необходимо повысить концентрацию кислорода в окружающей среде и диффузионный обмен внутри и вне частицы за счет аэродинамической организации процесса сжигания топлива в высокотурбулизированном потоке.

В факеле одновременно происходит горение частиц которые отличаются между собой на 1, 2,3 порядка по размерам. Горение крупных и мелких частиц происходит по разному. Реагирование мелкой частицы с воздухом ( $t_B = 400-500^\circ\text{C}$ ) не особенно интенсивно. Интенсификация может быть достигнута за счет рециркуляции продуктов сгорания. За счет теп-

ла продуктов сгорания мелкая частица прогревается быстрее, происходит интенсивное выделение летучих, которые сгорают и нагревают смесь.

Увеличение температуры смеси увеличивает скорость горения и частица быстро воспламеняется и интенсивно сгорает. Причем мелкие частицы лучше горят при меньших значениях  $\alpha$ . При этом интенсивнее повышается температура за счет увеличения удельной реагирующей поверхности ( $F/V_{\text{смеси}}$ ). Горение мелкой частицы происходит в кинетической или промежуточной областях (как газ).

Горение крупных частиц отличается от мелких из-за уменьшения диффузии кислорода и при достижении высокой температуры, горение крупной частицы переходит в диффузионную область. В результате уменьшения поверхности, газовая среда нагревается слабее, передача тепла от газов к твердым частицам происходит при большей разности температур. Поэтому период воспламенения и горения крупных частиц больше чем у мелких. С уменьшением коэффициента расхода воздуха увеличивается удельная реакционная поверхность и нагрев газов увеличивается. В данных условиях горение происходит в диффузионной области, но это не приводит к интенсификации процесса горения. При увеличении коэффициента расхода воздуха  $\alpha$  увеличивается концентрация кислорода и горение протекает более интенсивно.

В результате перемешивания частиц в потоке факела, температура и состав газовой фазы выравниваются и становятся практически одинаковыми для частиц различных размеров. Однако, концентрация газовых реагентов у поверхно-

сти частиц и температура их при горении будут различны в зависимости от размеров частиц.

Таким образом к достоинствам пылевидного топлива относятся:

- интенсивное и полное горение топлива с минимальным избытком воздуха. Этим достигается высокое использование тепла в печи;
- имеется возможность просто и удобно обслуживать топку, легко регулировать температуру печи;
- угольная пыль дает ярко светящийся факел, обильно излучающий тепло;
- достигается высокая теплотехническая эффективность и экономичность использования низкосортного топлива, не находящего себе иного применения.

Однако, способ сжигания пылевидного топлива в факеле имеет следующие недостатки:

- зола, остающаяся после сгорания угольных пылинок, мелко раздроблена, частично оседает на поверхностях, находящихся как в топке, так и в газоходах, а также уносится с продуктами сгорания и выбрасывается из дымовой трубы в окружающую атмосферу, засоряя огромные площади окрестностей. Чтобы устранить засорение необходима постройка эффективных очисток дыма от пыли;
- угольная пыль, имея огромную поверхность контакта с воздухом, подвержена быстрому окислению, поэтому во избежание пожара или взрыва она должна быть, использована немедленно по мере ее изготовления. Нормальный срок хранения готовой пыли – сутки. Дальнейшее хранение пыли (до 6 суток) возможно, но не желательно. Иначе

может произойти самовозгорание и уплотнение пыли в комки, что затруднит дальнейшее ее использование.

Угольную пыль, при факельном способе сжигания, сжигают в устройствах называемых пылеугольными горелками. Для сжигания угольной пыли применяют два вида горелок: вихревые, прямоточные. В вихревых горелках пылевоздушную смесь и воздух подают в виде закручиваемых струй, в прямоточных – в виде прямых струй.

Широкое распространение в промышленности при отоплении котельных агрегатов большой производительности получили горелки вихревого типа. Их можно условно разделить на три вида:

1. Двухулиточные горелки, с улиточным подводом пылевоздушной смеси и воздуха.
2. Улиточно-лопаточные, с улиточным подводом смеси и лопаточным подводом воздуха.
3. Прямоточно-улиточные, с прямоточным подводом смеси и улиточным подводом воздуха.

Конструкции пылеугольных горелок приведены в приложении А.

#### **4.3.1 Методика расчета пылеугольных горелок**

Расчет горелок необходимо производить после выбора топлива, способа сжигания, выбора и расчета схемы пылеприготовления и составления воздушного баланса парогенератора.

В расчет горелок включают выбор типа и производительности горелки, определение сечения каналов пылевоздушной смеси и вторичного воздуха, расчет закручивающих

аппаратов вихревых горелок, определения сопротивления горелки по тракту первичного и вторичного воздуха.

Тип горелки выбирается в соответствии с технологическим и аэродинамическим способом организации пылевидного сжигания по сорту топлива. Число горелок выбирается в зависимости от паропроизводительности парогенератора и способа компоновки горелок.

Производительность горелки – количество тепла выделяемое в топке при сжигании определенных порций топлива в единицу времени, проходящих через горелку.

$$Q_r = B \cdot Q_n^p$$

где  $B$  – расход топлива через горелку, кг/с;  $Q_n^p$  - теплота сгорания угля МДж/кг, кДж/кг.

Тепловая мощность горелки определяется по формуле:

$$Q_r = \frac{Q_n^p \cdot B}{m}$$

где  $B$  – расход топлива на парогенератор, кг/с;  $m$  – число горелок на парогенератор, шт;

Для получения сравнительных данных горелок, предназначенных для различных топлив, производительность их относят к одному сорту твердого топлива, чаще всего к АШ. Производительность горелки  $D_{усл}$ , кг/с, также условно можно определить по количеству пара, выработанному на одну горелку

$$D_{усл} = \frac{D}{m}$$

Выходное сечение канала пылевоздушной смеси при подаче угольной пыли отработанной сушильным агентом,  $F_1, м^2$

$$F_1 = \frac{V_0 \cdot c \cdot a \cdot n}{m \cdot W} \frac{t_1 + 273}{273} \frac{P_0}{P_1},$$

где  $V_{o.c.a}$  – количество влажного отработанного сушильного агента на 1 кг топлива при  $0^\circ\text{C}$  и  $101325$  Па, соответствуют в общем случае, при сушке смесью топочных газов с горячим воздухом,  $\text{м}^3/\text{кг}$ .

$$V_{o.c.a} = \left( \frac{r_r}{\rho_{0r}} + \frac{r_{r.v} + K_{прс}}{\rho_{0в}} \right) g_1 + \frac{\Delta W}{0.804}, \quad (1)$$

где  $r_r$   $r_{r.v}$  – соответственно доли топочных газов и горячего воздуха в сушильном агенте, определенные из соотношения:

$$C_r \cdot v \cdot r_r + C_{r.v} \cdot t_{r.v} (1 - r_r) = C_{c.a} \cdot t_1 \quad (2)$$

При сушке горячим воздухом в формуле (2) имеем  $r_r = 0$  и  $r_{r.v} = 1$ ;  $K_{прс}$  – коэффициент присоса холодного воздуха в долях от  $g_1$ , равной для ШБМ с промбункером при сушке смесью топочных газов с горячим воздухом от 0,45 до 0,25, а при сушке горячим воздухом – 0,4 ÷ 0,2; для ШБМ с прямым вдуванием – 0,30 ÷ 0,15, причем меньшее значение относится к мельницам большой мощности: для молотковых мельниц – 0,1, для среднеходовых – 0,2;  $g_1$  – количество сушильного агента, необходимое для сушки 1 кг свежего топлива от начальной влажности пыли  $W^{пл}$ , кг/кг.

$$g_1 = v_r^{yx} \rho_{0r}$$

где  $v_r^{yx}$  – объем уходящих газов на 1 кг топлива,  $\text{м}^3/\text{кг}$  при температуре  $0^\circ\text{C}$  и давлении  $0,1013$  МПа;  $\rho_{0r}$  – плотность дымовых газов;  $\Delta W$  – количество испаренной влаги на 1 кг сырого топлива кг/кг

$$\Delta W = \frac{W^p - W^{пл}}{100 - W^{пл}}$$

где  $W^p, W^{пл}$  – начальная влажность топлива и конечная влажность пыли;  $n$  – доля отработанного сушильного агента,

используемого в качестве среды для транспорта пыли в горелки;  $t_1$  и  $P_1$  – температура и давление транспортирующего агента, °С, МПа;  $W_1$  – скорость пылевоздушной смеси на выходе из горелки, м/с,  $P_0 = 0,1013$  МПа.

При подаче пыли горячим воздухом

$$F_1 = \frac{V_1}{mW_1} \frac{t_1 + 273}{273} \frac{P_0}{P_1}$$

где  $V_1$  – количество первичного воздуха,  $t_1 = v_{\text{пг}} = 300-400$  °С – температура уходящих газов за парогенератором.

В установках с подсушиванием пыли отработанным сушильным агентом, количество первичного воздуха определяемого по формулам

$$V_1 = n \cdot V_B^{\text{o.c.a}}$$

где  $V_B^{\text{o.c.a}}$  – количество воздуха, содержащегося в отработанном сушильном агенте, м<sup>3</sup>/кг;  $n$  – доля отработанного влажного сушильного агента, используемого для подачи пыли в горелки.

Количество воздуха, подаваемого через сбросные сопла

$$V_B^{\text{сбр}} = (1-n)V_B^{\text{o.c.a}}.$$

Количество воздуха, содержащегося в сушильном агенте, при сушке топлива смесью горячего воздуха с продуктами сгорания

$$V_B^{\text{o.c.в}} = \frac{r_{\text{гв}} + K_{\text{прс}}}{\rho_{\text{са}}} g_1$$

где  $r_{\text{гв}}$  – доля горячего воздуха в смеси;  $\rho_{\text{са}}$  – плотность сушильного агента, кг/м<sup>3</sup>.

При сушке горячим воздухом  $r_{\text{гв}} = 1$ , в схеме с прямым вдуванием пыли концентратом при сушке топочными газами  $r_{\text{гв}} = 0$ .



В установках с отбором продуктов сгорания для сушки, воздух, содержащийся в них, находится в замкнутом циркуляционном движении, не может быть использован для горения и поэтому не должен включаться в величину  $V_B^{o.c.B}$ .

Общее количество воздуха в отработанном сушильном агенте мельниц, поступающее в топку парогенератора, м<sup>3</sup>/с

$$V_B^{o.c.B} = \frac{10^3}{3600} (z_M \cdot B_M) v_{o.c.a}^B \frac{273+t_2}{273}$$

где  $v_{o.c.a}^B$  - количество воздуха в отработанном сушильном агенте на 1 кг размалываемого топлива, м<sup>3</sup>/кг. Причем объем воздуха в м<sup>3</sup> при температуре 0°С и давлении 0,1013 МПа;  $z_M$  - число мельниц, установленных в системе пылеприготовления парогенератора;  $B_M$  - производительность мельниц, т/ч;  $\frac{273+t_2}{273}$  - коэффициент пересчета объема воздуха с температуры 0°С, при которой определена величина  $v_{o.c.a}^B$  на температуру  $t_2$ , отработанного сушильного агента мельниц.

После определения первичного воздуха производится проверка его по таблице 4.1

Таблица 4.1 – Рекомендуемое количество первичного воздуха

Топливо	Р-д первичного воздуха, % от теоретически необходимого на горение при транспортировании пыли	
	горячим воздухом*	сушильным агентом
АШ, полуантрациты и тощие угли	15-20	20-25
Каменные угли	20-25	25-35
Бурые угли	20-25	45-55

\* при промбункере.

Примечание: 1. При сушке топлива газами или смесью газов и воздуха количество воздуха в сушильном агенте за мельницей должно быть не менее  $0,15V^\circ$ ;

2. Температура аэросмеси для углей с  $V_r > 35\%$  не должна превышать  $160^\circ\text{C}$ .

Выходное сечение канала вторичного воздуха  $F_2$ ,  $\text{м}^2$ .

$$F_2 = \frac{V_2}{mW_2} \frac{t_2 + 273}{273} \frac{P_0}{P_1}$$

где  $V_2$  – расход вторичного воздуха,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$W_2$  – скорость вторичного воздуха,  $\text{м}/\text{с}$ ;

$t_2 = t_m'' - 10 = 80 - 10 = 70^\circ\text{C}$ ;

$t_m''$  – температура уходящих газов после мельницы.

Количество первичного и вторичного воздуха, выбор скорости их выхода из горелки производится в зависимости от реакционных свойств топлива, типа горелок, способа их расположения на парогенераторе и условий организации процесса зажигания в рассматриваемой топке. Рекомендуемые скорости первичного и вторичного воздуха на выходе из горелки приведены в таблице 4.2. Сопротивление горелки по тракту первичного или вторичного воздуха,  $\Delta P$ , Па.

$$\Delta P = \xi \frac{W^2 \rho}{2}$$

где  $\xi$  – коэффициент сопротивления по первичному или вторичному воздуху;  $W$  и  $\rho$  – выходная скорость первичного и вторичного воздуха,  $\text{м}/\text{с}$ , а также тепловая мощность грелок представлены в таблице 4.2

Коэффициент сопротивления по тракту вторичного воздуха берется как для чистого газа, а по тракту первичного  $\xi_1$  берется как для запыленного воздуха.

Таблица 4.2 – Скорости пылевоздушной смеси  $W_1$ , вторичного  $W_2$  и сбросного воздуха на выходе из горелок

Тип горелок	Тепловая мощность горелок, МВт	Антрацитовый штыб и тощие угли			Каменные и бурые угли		
		$W_1$ , м/с	$W_2$ , м/с	$W_1/W_2$	$W_1$ , м/с	$W_2$ , м/с	$W_1/W_2$
1	2	3	4	5	6	7	8
Двухулиточные	23,2	14-16	18-21	1,3-1,4	20-22	26-28	1,3-1,4
	34,8	14-16	18-21	1,3-1,4	22-24	28-30	1,3-1,4
	52,2	16-18	22-25	1,3-1,4	22-24	28-30	1,3-1,4
	75,4	18-20	26-30	1,4-1,5	24-26	30-34	1,3-1,4
Прямоточно-улиточные	23,2	14-16	17-19	1,2-1,3	18-20	22-25	1,2-1,3
	34,8	14-16	17-19	1,2-1,3	18-20	22-25	1,2-1,3
Улиточно-лопаточные	34,8	18-20	25-28	1,3-1,4	22-24	30-34	1,3-1,4
	52,2	18-20	25-28	1,3-1,4	22-24	30-34	1,3-1,4
	75,4	20-22	28-30	1,4-1,5	24-26	34-36	1,4-1,5
Прямоточные	23,2	18-20	28-30	1,5-1,6	24-26	36-42	1,5-1,6
	34,8	18-20	29-32	1,6-1,7	26-28	42-48	1,6-1,7
	52,2	20-22	34-37	1,6-1,7	28-30	48-50	1,6-1,7
Прямоточные при мельницах-вентиляторах <sup>1,2</sup>	23,2	-	-	-	15-20	40	2,0-2,5
	52,2	-	-	-	15-20	50-60	3,0-3,3
Прямоточные с центральным или односторонним вводом вторичного воздуха <sup>1</sup>	23,2	26-28	30-34	1,2-1,3	27-29	42-45	1,5-1,6
	34,8	27-29	32-36	1,2-1,3	27-29	42-45	1,5-1,6
	52,2	28-30	36-38	1,3-1,4	29-31	48-50	1,6-1,7
Многощелевые, межтрубные потолочные для двухкамерных топок	23,2	-	-	-	22-24	32-34	1,4
	34,8	-	-	-	24-26	34-36	1,4
	52,2	-	-	-	24-26	34-36	1,4
Встречно-смещенные	23,2-34,8	-	-	-	24-30	32-45	1,3-1,5
Винто-лопаточные для вертикальных циклонов	58	20	60-70	3,0-3,5	30	60-70	2,0-2,3
	116	20	60-70	3,0-3,5	30	60-70	2,0-2,3
	162,4	20	60-70	3,0-3,5	30	60-70	2,0-2,3

Продолжение таблицы 4.2

1	2	3	4	5	6	7	8
Двухулиточные для горизонтальных циклонов (дробленка)	58	-	-	-	23-25	130-150	5,5-6,0
	87	-	-	-	23-25	130-150	5,5-6,0
	116	-	-	-	23-25	130-150	5,5-6,0
Прямоточные для горизонтальных циклонов (грубая пыль)	58	-	-	-	20-22	100-120	5-6
	87	-	-	-	20-22	100-120	5-6
	116	-	-	-	20-22	100-120	5-6
Сбросные сопла	-	-	-	-	35-45	-	-

Для двухулиточных горелок с цилиндрическим устьем  $\xi_1 = 5,0$ , а с коническим устьем –  $7,0$ ; для горелки ВТИ с завихривающими лопатками –  $1,85$ ; прямоточно-улиточных при угле раскрытия  $120^\circ$  –  $3,0$ , при угле раскрытия  $90^\circ$  –  $2,0$ ; при этом в первом типе горелок скорость относится к устью горелки, а во втором – к сечению цилиндрической части канала; для прямоточно-улиточных горелок с рассекателем БПК-ОРГРЭС-2,2; щелевых горелок с внутренним вводом вторичного воздуха –  $1,7$ ; сбросных горелок с круглым или прямоугольным сечением –  $1,2$ .

В случае расчета вихревых горелок рассчитывается также закручивающий аппарат.

Затем производят компоновку вихревых горелок т.е. обеспечение определенных расстояний между горелками и между ними и стенками. Ниже приводятся эти расстояния в зависимости от величины диаметра выходного сечения амбразуры  $D_a$ .

Расстояние от осей крайних горелок до примыкающих стен  $(1,4 - 1,6)D_a$ .

Расстояние от оси нижнего ряда горелок до верха шлаковых леток в топках с жидким шлакоудалением  $(1,8 - 2,2)D_a$

Расстояние между осями горелок по горизонтали: при однорядном  $(2,2 - 2,5)D_a$ , при  $2^{-x}$  рядном шахматном расположении  $(3,5 - 4,0)D_a$ , при  $2^{-x}$  рядном коридорном  $(2,5 - 3,0)D_a$ .

Расстояние между осями горелок по вертикали: при шахматном расположении  $(2,0 - 2,5)D_a$ , при коридорном расположении  $(2,5 - 3,0)D_a$ .

Расстояние между стенками, на которых установлены горелки  $(5 - 6,0)D_a$ .

Расстояние до противоположной стены при однофронтальном расположении  $(4 - 5,0)D_a$ .

Диаметр пылепроводов определяется по количеству сушильно-транспортного агента и его скорости, равной 25-30 м/с

#### **4.4 Термическая переработка твердого топлива**

Изменения, связанные с нагреванием любого вещества (топлива) проявляются в следующем:

- изменение агрегатного состояния вещества (плавление, испарение) не сопровождается изменением структуры молекул;
- при достижении некоторого температурного уровня происходит разрушение молекул с образованием новых, более стойких, при данной температуре.

По отношению к температуре топливо может быть теплоустойчивым и теплонеустойчивым.

Топливо, которое при изменении температуры меняет свое агрегатное состояние не изменяя структуры молекул называется

теплоустойчивым. Топливо, которое при нагреве претерпевает изменения связанные с образованием новых молекул называется теплоустойчивым.

Пример: С, СО, Н<sub>2</sub> – теплоустойчивые.

Нетеплоустойчивые: СН<sub>4</sub>=С+2Н<sub>2</sub>; С<sub>м</sub>Н<sub>п</sub>=mС+n/2 Н<sub>2</sub>.

Факторами влияющими на степень и характер термического разложения топлива являются: температура, длительность нагрева, давление, природа топлива, каталитическое действие поверхностей.

Температура оказывает сильное воздействие на тип реакций и их скорость. Чем выше температура, тем быстрее идет процесс разложения и тем глубже расщепление молекул. Увеличение длительности нагрева оказывает такое же действие, как и повышение температуры. С увеличением времени нагрева твердого топлива первичное разложение претерпевает существенное изменение.

Твердое топливо используют не только в качестве энергетического сырья, но и подвергают термической переработке с целью получения целого ряда продуктов кокса, жидкого топлива, горючих газов.

Однако при этом перед термической переработкой топливо проходит предварительную обработку, которая предполагает:

1. Грохочение (разделение на сорта и классы по крупности кусков).
2. Дробление до необходимых размеров.
3. Обогащение (удаление или уменьшение в топливе минеральных веществ).
4. Обеспыливание и сушку.
5. Шихтовку (т.е. приготовление смеси).

В зависимости от использования твердого топлива оно может проходить все стадии подготовки или часть из них.

В промышленности применяют следующие виды термического

разложения твердого топлива (сухая возгонка, коксование и безостаточная газификация).

Газификация топлива является термохимическим процессом превращения всей горючей массы топлива под воздействием кислорода в горючий газ. Кислород может подводиться к топливу с атмосферным воздухом или воздухом, обогащенным кислородом, в виде технически чистого кислорода, а также в составе водяного пара или двуокиси углерода.

#### **4.4.1 Сухая перегонка твердого топлива**

При сухой перегонке топлива в газ и смолу переходит только летучая часть топлива, а остаточным продуктом является кокс или полукокс. Сухая перегонка или коксование – термохимический процесс нагрева твердого топлива без взаимодействия его с кислородом (без доступа воздуха). В зависимости от температуры процесса различают полукоксование, протекающее при температуре 500-550<sup>0</sup>С и коксование при нагреве твердого топлива до 1000-1100<sup>0</sup>С.

По мере нагревания в твердом топливе происходят характерные изменения. В пределах температур 100-150<sup>0</sup>С происходит выделение гигроскопической влаги. При температуре 150-200<sup>0</sup>С выделяется двуокись углерода и пирогенетическая вода, образующаяся в результате протекания самого процесса сухой перегонки. Дальнейший подъем температуры приводит к возгонке высокомолекулярных углеводородных соединений, образующих группу смол. В интервале температур 350-450<sup>0</sup>С идет интенсивное разложение топлива, сопровождающееся выделением водорода, метана и непредельных углеводородов. При одновременном усилении выхода смол. При достижении температуры 500-550<sup>0</sup>С разложение твердого топлива прекращается.

Если продолжать нагрев топлива, доведя температуру до 1000-1100°С, происходит дополнительное выделение оставшихся летучих продуктов из топлива и подвергаются значительному изменению образовавшиеся первичные продукты. Происходит расщепление (крекинг) тяжелых молекул смол, количество которых снижается, а количество более легких газов (СН<sub>4</sub>, Н<sub>2</sub>) увеличивается. В связи с вышеизложенным следует, что в зависимости от температуры, при которой протекает термическое разложение твердого топлива, различают два вида процесса:

1. Низкотемпературное полукоксование, протекающее при температуре 500-550°С.
2. Высокотемпературное коксование, протекающее при температуре 1000-1100°С.

Продуктами полукоксования являются: полукоксовый газ, смола, полукокс. Продукты же коксования: коксовый газ, коксовая смола, кокс. Различие температуры процессов обуславливает и различие в свойствах и количествах, получаемых продуктов. Шихта для полукоксования и коксования состоит из 22% жирного и 78% газового углей. В количественном отношении получают при полукоксовании кокса в процентах по массе-82, смолы-6.6, газа-6.8. При коксовании соответственно 72, 4.1, 15.6 %.

Состав получаемых газов, % по объему при:

	Полукоксовании	Коксовании
Н <sub>2</sub>	26.7	60.4
СН <sub>4</sub>	53.4	24.1
СО <sub>2</sub>	4.5	2.0
С <sub>м</sub> Н <sub>н</sub>	3.7	2.8
СО	5.9	5.5
Н <sub>2</sub>	5.8	5.2
Q <sub>н</sub> <sup>р</sup> -МДж/м <sup>3</sup>	28.7	17.8



Выход продуктов полукоксования и коксования зависит от природы перерабатываемых топлив.

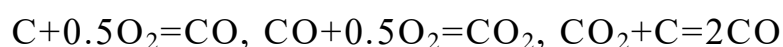
1. С увеличением геологического возраста топлива выход газа, смолы и воды уменьшается, а выход кокса увеличивается.
2. С увеличением возраста топлива в образовавшемся газе уменьшается количество CO и CO<sub>2</sub>, а количество углеводородов и водородов увеличивается.
3. Более молодые угли разлагаются легче и при более низкой температуре.

При нагреве твердого топлива до высокой температуры в присутствии кислорода оно почти полностью сгорает и превращается в негорючие продукты.

Существующие установки полукоксования позволяют получать 8-20% смолы, 70% полукокса, 60-80 м<sup>3</sup> газа на тонну твердого топлива с теплотой сгорания 25-33 МДж/м<sup>3</sup> и 0.2-0.6% бензина.

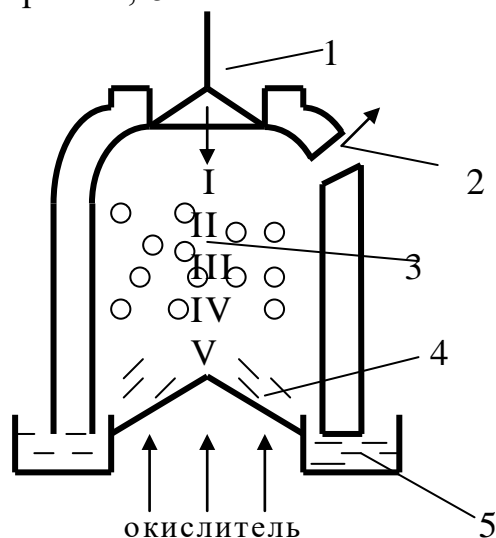
#### 4.4.2 Газификация твердого топлива

Газификация – процесс полного превращения всей горючей массы твердого топлива в горючие газы, осуществляемый при высокой температуре в присутствии окислителя. Состав и количество получаемых газов при газификации зависит от природы топлива, технологии газификации и состава окислителя. При газификации твердого топлива происходит неполное его горение с образованием горючего газа, состоящего в основном из CO. Процесс протекает по следующим реакциям:



Устройства, в которых производят газификацию твердого топлива, называются газогенераторами (рисунок 4.2).

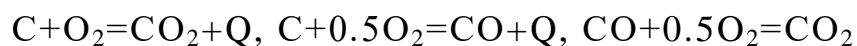
В газогенераторе имеются следующие зоны: 1 – сушки и подогрева топлива; 2 – сухой перегонки; 3 – восстановления или газификации; 4 – горения; 5 – шлака и золы.



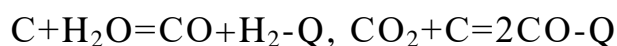
1 – загрузочное устройство; 2 – отвод газа; 3 – шахта газификации; 4 – колосниковая решетка; 5 – гидрозатвор.

Рисунок 4.2 - Схема газогенератора

В зоне горения протекают следующие реакции;



В зоне восстановления:



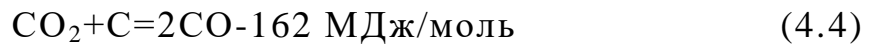
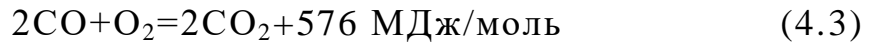
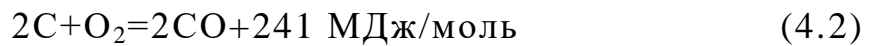
Дутье, проходя через слой шлака и золы, подогревается. В зоне горения окислитель вступает в реакцию с углеродом с образованием CO и CO<sub>2</sub>, причем CO<sub>2</sub> больше CO.

Деление на зоны пространства газогенератора чисто условно т.к. процессы в нем идут параллельно и могут накладываться друг на друга. В зависимости от состава дутья генераторные газы делят на 4 группы:

1. Воздушный – при воздушном дутье.
2. Водяной – при паровом дутье.
3. Смешанный – при паровоздушном дутье.

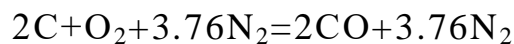
## 4. Парокислородный – при парокислородном дутье.

При применении в качестве дутья воздуха в газогенераторе идут следующие реакции:



Первые две реакции идут в основном в зоне горения и идут до конца. Две последние происходят в зоне газификации и являются обратимыми. Рассмотрим получение газогенераторных газов.

**Воздушный газ.** При газификации сухим воздухом получается воздушный газ. Уравнение процесса получения идеального воздушного газа можно записать в следующем виде:



Тогда выход газа с одного килограмма углерода согласно уравнению газификации равен:

$$V_{\text{газа}} \frac{V_{CO} + V_{N_2}}{2M_c} \cdot 22.4 = \frac{2 + 3.76}{2 \cdot 12} \cdot 22.4 = 5.38, \text{ м}^3/\text{кг}$$

где  $V_{CO}$ ,  $V_{N_2}$  – объемы окиси углерода и азота в генераторном газе,  $\text{м}^3$ ;  $M_c$  – молекулярная масса углерода, кг.

Состав воздушного генераторного газа, %:

$$CO = \frac{V_{CO} \cdot 100}{V_{CO} + V_{N_2}} = \frac{2}{2 + 3.76} \cdot 100 = 34.7$$

$$N_2 = \frac{V_{N_2} \cdot 100}{V_{CO} + V_{N_2}} = \frac{3.76}{2 + 3.76} \cdot 100 = 65.3$$

Теплота сгорания воздушного газа,  $\text{МДж/м}^3$ :

$$Q_{\text{н}}^{\text{р}} = \frac{Q_{CO} \cdot \%CO}{100} = \frac{12.8 \cdot 34.7}{100} = 4.44$$

где  $Q_{CO}$  – теплота сгорания окиси углерода, МДж/м<sup>3</sup>;

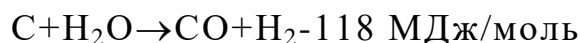
CO – содержание окиси углерода, %.

Коэффициент полезного действия газификации при получении воздушного генераторного газа, %:

$$\eta = \frac{V_r \cdot Q_n^p}{(Q_n^p)_{\text{угл}}} \cdot 100 = \frac{5.38 \cdot 4.44}{34.1} \cdot 100 = 70$$

где 34.1 – теплота сгорания углерода, МДж/кг.

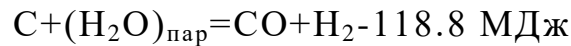
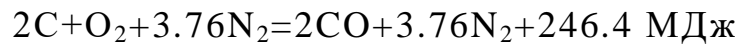
**Водяной газ.** При продувке через раскаленный слой углерода водяного пара получаем водяной газ по следующим реакциям:



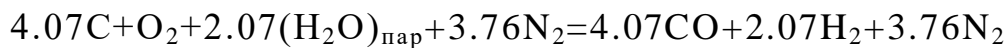
Так эти две реакции являются эндотермическими, то процесс газификации без подвода тепла извне не идет. Поэтому в газогенератор попеременно подают то воздушное, то паровое дутье. Период воздушной продувки называют фазой воздушного или горячего дутья, получающийся при этом газ выбрасывают в атмосферу. Период продувки паром называют фазой парового дутья или периодом газования. Совокупность двух фаз составляет рабочий цикл газификации. Состав водяного газа при этом следующий, %: H<sub>2</sub> до 50; CH<sub>4</sub> до 6; CO до 40; CO<sub>2</sub>-6; N<sub>2</sub>-2; Q<sub>n</sub><sup>p</sup>-10-11 МДж/м<sup>3</sup>. КПД газификации в реальных условиях не превышает 60-65% из-за потерь тепла с продувочными газами.

Следует отметить, что водяной газ самостоятельного значения как промышленное топливо не получил.

**Смешанный газ.** При использовании в качестве дутья смеси пара с воздухом, получаем паровоздушный газ. При этом расход воздуха составляет 2,2-2,8 м<sup>3</sup>/кг. угля, расход пара 0,2-0,5 кг/кг. угля. Расход воздуха и пара находятся в обратной зависимости, при этом протекают следующие реакции:



В идеальных условиях в целях приведения к нулю суммарного теплового эффекта обеих реакций на 2 кмоль углерода в первой реакции следует принять  $246.4/118.8=2.07$  кмоль углерода во второй реакции. Тогда общее уравнение процесса будет иметь вид:



Выход смешанного газа, м<sup>3</sup>/кг. угля:

$$V_{\text{газа}} \frac{V_{CO} + V_{H_2} + V_{N_2}}{4.07M_c} \cdot 22.4 = \frac{4.07 + 2.07 + 3.76}{4.07 \cdot 12} \cdot 22.4 = 4.55$$

где  $V_{CO}$ ,  $V_{H_2}$ ,  $V_{N_2}$  – объемы окиси углерода, водорода и азота в генераторном газе, м<sup>3</sup>; 22.4 – объем одного кмоль газа, м<sup>3</sup>.

Состав смешанного газа, %:

$$CO = \frac{V_{CO} \cdot 100}{V_{CO} + V_{H_2} + V_{N_2}} = \frac{4.07}{4.07 + 2.07 + 3.76} \cdot 100 = 41.0$$

$$H_2 = \frac{V_{H_2} \cdot 100}{V_{CO} + V_{H_2} + V_{N_2}} = \frac{2.07}{4.07 + 2.07 + 3.76} \cdot 100 = 20.9$$

$$N_2 = \frac{V_{N_2} \cdot 100}{V_{CO} + V_{H_2} + V_{N_2}} = \frac{3.76}{4.07 + 2.07 + 3.76} \cdot 100 = 38.1$$

Теплота сгорания идеального газа, МДж/м<sup>3</sup>:

$$Q_{\text{н}}^{\text{р}} = \frac{Q_{CO} \cdot \%CO + Q_{H_2} \cdot \%H_2}{100} = \frac{12.8 \cdot 41 + 10.8 \cdot 20.9}{100} = 7.5$$

где  $Q_{CO}$ ,  $Q_{H_2}$  – теплота сгорания одного метра кубического окиси углерода и водорода, МДж/м<sup>3</sup>;

$CO$ ,  $H_2$  – содержание окиси углерода, водорода в газе, об. %.

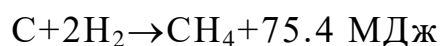
Тогда КПД газификации составит:

$$\eta = \frac{V_{\text{г}} \cdot Q_{\text{н}}^{\text{р}}}{(Q_{\text{н}}^{\text{р}})_{\text{угл}}} \cdot 100 = \frac{4.55 \cdot 7.5}{34.15} \cdot 100 = 100\%$$

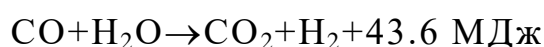
При этом состав реального смешанного газа, %:  $H_2$  – 15;  $CH_4$  – 25;  $CO$  – 25;  $CO_2$  – 15;  $N_2$  – 40-60.

**Парокислородный газ.** Для увеличения коэффициента полезного действия газогенератора в некоторых случаях в качестве дутья применяют парокислородную смесь. КПД возрастает от 40-60% до 70-80%. Теплота горения газа повышается до 10 МДж/м<sup>3</sup>. Состав парокислородного газа, %:  $H_2$  до 40; углеводород – 5;  $CO$  – 30-40;  $CO_2$  – 20;  $N_2$  – 4-20.

Представляют большой интерес газогенераторы, работающие под давлением 1,5-2,5 МПа с применением парокислородного дутья. Проведение процесса газификации под повышенным давлением в соответствии с принципом Ле-Шателье смещает равновесие в сторону увеличения содержания в генераторном газе более тяжелых соединений. Помимо реакции образования окиси углерода и водорода в шахте газогенератора интенсивно происходит образование метана по уравнениям:



Кроме того, усиливается образование окиси углерода по уравнению:



В результате промывки водой при повышенном давлении большая часть двуокиси углерода удаляется и теплота сгорания газа за счет увеличенного содержания метана повышается до 16.5 МДж/м<sup>3</sup> и выше. Такой газ может успешно транспортироваться на значительные расстояния (сотни километров и более) за счет избыточного давления на выходе из газогенераторной установки. Однако процесс газификации под давлением сопровождается получением значительного количества смол.

## 5 ОСОБЫЕ СЛУЧАИ СЖИГАНИЯ ТОПЛИВ

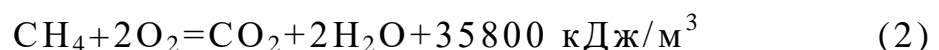
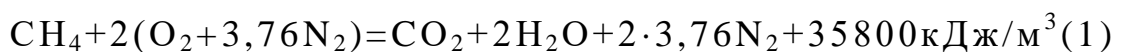
К особым случаям сжигания топлив относятся:

1. Сжигание топлива в атмосфере чистого кислорода или в воздухе, обогащенном кислородом.
2. Каталитическое сжигание топлива.
3. Топливные элементы.
4. Сжигание водомазутных эмульсий.
5. Сжигание водоугольных суспензий.
6. Сжигание топлива в циклонах.
7. Наложение на факел дополнительного тепла за счет электроэнергии.
8. Использование низкочастотных пульсаций и акустических колебаний.
9. Сжигание высокозольных углей в энергетических установках.

Рассмотрим поподробнее каждый из этих способов.

### 5.1 Сжигание топлива в атмосфере чистого кислорода или в воздухе, обогащенном кислородом

Рассмотрим процесс сжигания газообразного топлива на примере горения метана.



Первое уравнение представляет собой не что иное, как сжигание метана в обычном атмосферном воздухе, второе – сжигание метана в чистом кислороде. Объемы продуктов сгорания соответственно для первого и второго уравнения

составят:  $V_1=10.52 \text{ м}^3/\text{м}^3$  газа;  $V_2=3 \text{ м}^3/\text{м}^3$  газа. Тогда энтальпии дыма для первого и второго уравнений равны:

$$i_1 = \frac{Q_{\text{н}}^{\text{р}}}{V_{\text{п.г}}^{(1)}} = \frac{35800}{10.52} = 3400 \text{ кДж/кг}, \quad i_2 = \frac{Q_{\text{н}}^{\text{р}}}{V_{\text{п.г}}^{(2)}} = \frac{35800}{3} = 11950 \text{ кДж/кг}.$$

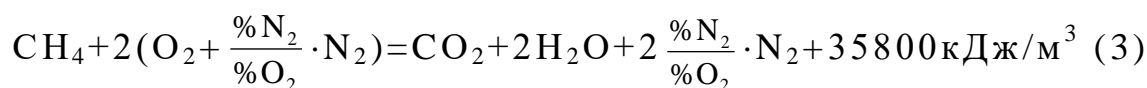
Калориметрическая температура горения определяется по следующему выражению:

$$t_{\text{кал}} = \frac{Q_{\text{н}}^{\text{р}}}{V_{\text{пс}} \cdot C_0^{t_{\text{рк}}}}$$

где  $Q_{\text{н}}^{\text{р}}$  – теплота сгорания топлива, кДж/м<sup>3</sup>;  $V_{\text{пс}}$  – объем продуктов сгорания единицы объема газа, м<sup>3</sup> дыма/м<sup>3</sup> газа;  $C_0^t$  – объемная теплоемкость продуктов сгорания, кДж/м<sup>3</sup>·К.

Из которого следует, что чем больше обогащение воздуха кислородом, тем выше температура горения.

Совершенно очевидно, что можно сжигать газ и в воздухе, обогащенном кислородом. Причем обогащение воздуха может быть от 21 до 100% кислорода. Тогда уравнение сжигания метана в обогащенном воздухе может быть записано в следующем виде:



Из уравнения (3) следует, что чем выше содержание кислорода в воздухе, предназначенном для горения, тем меньше объем продуктов сгорания и тем выше температура процесса горения.

Объем продуктов сгорания метана в обогащенном воздухе находится в пределах от 3 до 10.52 м<sup>3</sup>, а калориметрическая температура (жаропроизводительность топлива) изменяется в зависимости от объема дыма и составляет для данных условий 7000-2200 °С.



Идея применения кислорода при сжигании топлива принадлежит Д.И. Менделееву. Кислород при сжигании топлива впервые был применен в 30-х годах инженером Мозговым в мартеновских печах. В настоящее время кислород применяют:

- при сжигании всех видов топлива;
- при газокислородной конверсии углеводородных газов;
- при газификации углей.

Применение кислорода при сжигании топлива позволяет:

- повысить температурный уровень рабочей камеры, что ведет к сокращению времени тепловой обработки материалов, особенно в плавильных агрегатах. Это приводит к увеличению производительности и сокращению удельного расхода топлива;
- улучшить условия сжигания топлива (увеличивается концентрация реагирующих веществ т.к. снижается балласт). Процесс сжигания топлива можно вести с минимальным коэффициентом расходом воздуха;
- уменьшить количества продуктов горения, что приводит к уменьшению сопротивления дымового тракта, что позволяет увеличить тепловую мощность на существующих агрегатах.

К недостаткам применения кислорода при сжигании топлива относятся:

- повышенный угар технологического продукта;
- увеличение образования окислов азота (высокая температура и увеличенная концентрация кислорода).

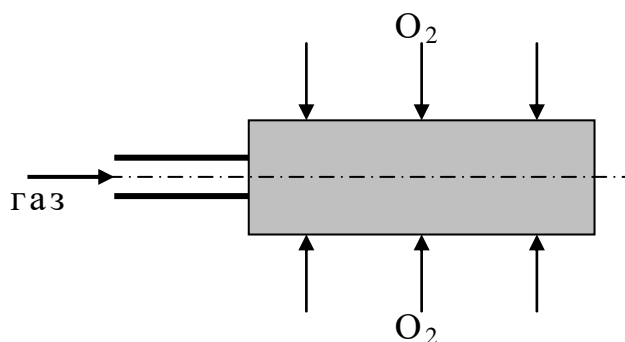
## 5.2. Каталитическое горение

Каталитическое горение - горение топлива в присутствии специальных веществ, ускоряющих процессы окисления горючих составляющих топлива. При применении катализаторов энергия активации снижается и процесс окисления происходит на поверхности катализатора при температурах на  $200-500^{\circ}\text{C}$  ниже чем при обычном горении, хотя и гораздо с меньшей скоростью. Каталитическое горение происходит не только в объеме, но и на поверхности огнеупора или катализатора. Каталитическое горение применяют в трех случаях:

1. Для достижения требуемой полноты сжигания. В технике сжигание топлива считается полным, если содержание  $\text{CO}$  в продуктах горения не превышает 1.5%. Однако, в некоторых случаях требуется более полное сжигание топлива. Пример. При сжигании газа в быту содержание  $\text{CO}$  не более 0.03%. Обычные методы сжигания не дают такой полноты сжигания и тогда применяют каталитическое горение.
2. При обезвреживании промышленных выбросов. В отходящих газах тепловых агрегатов почти всегда находятся продукты неполного горения топлива. Это происходит вследствие несовершенства топливо-сжигающих устройств или же недожог требуется по условиям технологии. Для обезвреживания продуктов горения, содержащих недожог, применяют катализаторы.
3. Сжигание топлива при  $t=200-500^{\circ}\text{C}$  т.е. при  $t_{\text{гор}} < t_{\text{воспл. топ.}}$ . Применяют этот метод, где невозможно потребление открытого огня (нефтегазоскважины и другие взрывопожарноопасные места).

Практикой установлено, что хорошим катализатором является шамот, если на его поверхности осаждены окислы металлов переменной валентности (Fe, N, Mg, Cr). Процесс окисления топлива в таком случае происходит при температурах на  $550^{\circ}\text{C}$  ниже, чем неактивированного шамота. Каталитическое сжигание газов можно осуществлять при трех способах подвода воздуха в зону горения.

1. Воздух поступает из окружающей среды путем диффузии к поверхности насадки, к которой подведено топливо.



2. Подача в зону горения газовой смеси с  $\alpha < 1$ , а остальной воздух путем диффузии поступает из окружающей среды.
3. Подача к месту горения газовой смеси с  $\alpha \geq 1$ .

При подаче в насадку одного газа горение происходит на поверхности насадки, а при подаче в насадку газовой смеси в ней возникает зона с максимальной температурой. Расположение этой зоны зависит от  $\alpha$  и тепловой нагрузки устройства.

### 5.3 Топливные элементы

Топливный элемент был изобретен в 1842 году. Топливный элемент является химическим генератором электрической энергии, в котором химическая энергия топлива преобразуется непосредственно в электрическую. По механизму

преобразования энергии топливный элемент не отличается от гальванического. Их отличие заключается лишь в том, что в гальваническом элементе запас активных веществ заключен в массе электродов и время действия гальванического элемента ограничено.

В топливном элементе активные вещества непрерывно восполняются в результате их подвода извне, также как и при работе топливо-сжигающих устройств. В гальваническом элементе используют твердые вещества: металлы и их окислы, а в топливном элементе используют жидкие и газообразные. Возможность непрерывной работы топливных элементов роднит их с обычной теплосиловой установкой (рисунок 5.1)

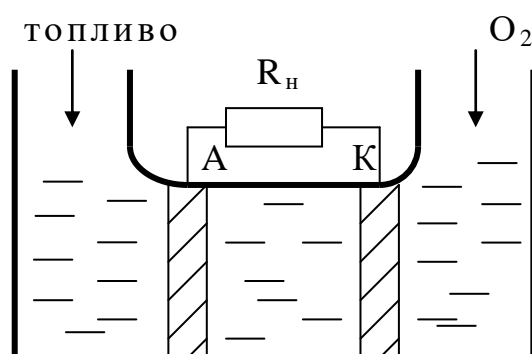


Рисунок 5.1 – Схема топливного элемента

В сосуде с электролитом находятся 2 электрода: анод и катод. К поверхности анода непрерывно подводят восстановитель (топливо), а к поверхности катода (окислитель)  $O_2$ . Анод приобретает более отрицательный заряд и при замыкании цепи в ней возникает электрический ток, а на границах электролит-электроды происходят следующие химические реакции:



где  $e$  – заряд электрона.

Наибольшее распространение получили кислородо-водородные топливные элементы с ионообменной мембраной вместо электролитов. Мембрана пропускает ионы водорода и не пропускает катионы гидроксидов и кислорода. Применяют в космических кораблях.

#### **5.4 Сжигание водомазутных эмульсий**

Сжигание в факеле сильно обводненного топлива затруднено. Наличие в топливе до 5% влаги не сказывается на процессе сжигания, хотя и понижает теплоту горения топлива. Увеличение содержания влаги до 10% при обычном способе сжигания приводит к нестабильному факелу, т.е. происходит срыв горения, сжигание такого топлива затруднено. Однако, сжигание сильно обводненного жидкого топлива можно производить слоевым методом или безфорсуночным, при котором слой обводненного топлива продувается воздухом. Воздух, проходя через слой топлива, вспенивает его и создает режим динамически устойчивой пены. При этом часть жидкого топлива испаряется и попадает в пузырьки воздуха, а часть выносится из слоя в виде брызг. Топливо-воздушная смесь, выходя из слоя, воспламеняется и горит в надслоевом пространстве, в которое подается дополнительный воздух.

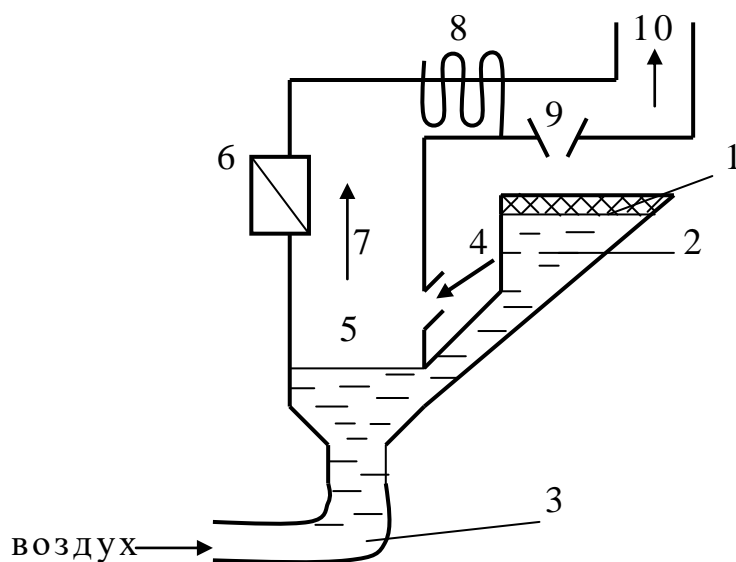
Предварительный подогрев и испарение обводненного топлива, перегрев топливовоздушной смеси осуществляется за счет тепла надслоеного факела. Жидкое топливо обволакивает мелкие капли воды, которые в зоне с высокой температурой испаряются раньше, чем топливо ( $t_{\text{кал.топл.}}=150-200^{\circ}\text{C}$ ,  $t_{\text{кип.Н}_2\text{O}}=99^{\circ}\text{C}$ ). Пары воды разрушают капли и умень-

шают размер коксовых частиц.

На практике применяется безфорсуночный процесс сжигания топлива, который осуществляется горелками барботажного типа. При этом с увеличением процента влаги в топливе процесс проходит последовательно три стадии (зоны устойчивости):

1. Устойчивое равномерное горение при увеличении содержания влаги до 70-75%.
2. Зона временного срыва горения, которое может возобновиться лишь при наличии дежурной растопочной горелки. Это зона нестабильного горения. При увеличении влажности до 80% и выше наступает третья зона.
3. Зона полного срыва горения.

На рисунке 5.2 представлена установка для сжигания обводненного топлива.



- 1 – фильтр; 2 – емкость для топлива; 3 – подвод воздуха; 4 – запальная горелка; 5 – камера сжигания; 6 – тангенциальный подвод вторичного воздуха; 7 – камера дожигания; 8 – теплообменник; 9 – циклон для улавливания золы; 10 – отвод продуктов горения.

Рисунок 5.2-Установка для сжигания обводненного топлива

Температура в камере горения  $1500^{\circ}\text{C}$  и более, производительность до трех тонн в час. Содержание влаги до 65-75%. Применяются для сжигания отходов нефтегазоочистки, очистки производства рыбьего жира и т.д.

### **5.5 Сжигание водоугольных суспензий**

Быстрый рост добычи угля обуславливает применение мокрого обогащения методом флотации. В отходы попадает при обогащении 1,5-2,0% угля или 20 млн. т. в год.

Подготовка обводненного твердого топлива к сжиганию требует глубокого обезвоживания и сушки, что весьма неэкономично, особенно для топлива с повышенной зольностью. Перспективным методом сжигания обводненного твердого топлива является факельное сжигание в виде угольных суспензий.

Водоугольная суспензия это смесь воды и угля. Содержание воды до 55%. Водоугольные суспензии легко воспламеняются и устойчиво горят, обладают свойством жидкости, легко транспортируются по трубопроводам. Можно хранить, транспортировать и сжигать как жидкое топливо. При горении водоугольных суспензий образуются пористые агломераты. Вода активизирует поверхность угля и является промежуточным окислителем. С ростом начального размера капель длина зоны горения увеличивается, как и для твердого топлива. Температура воспламенения суспензии с ростом зольности возрастает особенно при  $A \geq 40\%$ . Обычно зольность флотационных отходов составляет 60 – 70%. Суспензии являются новым видом топлива и обладают следующими свойствами:

1. Высокой реакционной способностью, независящей от возраста угля.
2. Строго постоянные и заданные вперед составы по влажности и вязкости.
3. Высокая стойкость против окисления при хранении.
4. Легко транспортируется по трубам в готовом виде и упрощает всю систему подачи топлива.

Факельное сжигание водоугольных суспензий связано с двумя последовательными операциями:

1. Дробление суспензий до размера капель, обеспечивающих горение.
2. Равномерное смесеобразование капель с воздухом (как и для жидкого топлива).

Чем лучше смесеобразование, тем меньше химический недожог и тем выше температура горения:

$$t = \frac{Q_n^p + Q_\phi^b + Q_\phi^r}{V_{п.г} \cdot c_0^t}$$

Фактическая температура тем ближе к калориметрической, чем быстрее завершится процесс горения. Современные способы повышения температуры горения следующие:

1. Подогрев газа и воздуха (увеличение  $Q_{физ}$  воздуха и газа).
2. Обогащение воздуха кислородом (уменьшается объем продуктов горения).
3. Улучшение смесеобразования (снижение коэффициента расхода воздуха).

Однако, действительная температура горения ниже т.к. затрачивается тепло на диссоциацию продуктов сгорания при  $t > 1300^{\circ}\text{C}$  и на покрытие тепловых потерь.



### **5.6 Сжигание топлива в циклонах**

Стремление к форсированию смесеобразования привело к циклонной схеме сжигания топлива. В результате большой разности скоростей топлива и воздуха и уменьшения объема горения в циклоне осуществляется интенсивный теплообмен. В циклонах температуры настолько высоки, что позволяют, при сжигании твердого топлива, получать золу в расплавленном виде. Конвективная составляющая теплоотдачи в циклонной камере увеличивается в два раза, а интенсивность тепловосприятия на стенах камеры возрастает в 8-10 раз.

При этом расплавленная зола, стекает по стенкам циклонов, образует самовостанавливающую футеровку или гарнисаж.

### **5.7 Наложение на факел дополнительного тепла за счет электроэнергии**

Пламя является слабо ионизированной средой (газом) обладает электрическим сопротивлением. Поэтому при пропускании через факел электрического тока выделяется тепло. Температуру факела можно регулировать независимо от  $\alpha$  изменяя мощность. Это позволяет получать окислительный, восстановительный или нейтральный факел с  $\alpha$  от 0,4 до 1,8 с температурой  $t \geq 4000^{\circ}\text{C}$ .

Преимуществами электро-газовых горелок являются:

1. Получение рассеянного, диффузионного факела с высокой температурой.
2. Электрический ток распределяется по всему объему факела, обеспечивая равномерный нагрев и равномерное температурное поле.

3. Возможность изменять степень черноты факела путем регулирования сажеобразования, управляя таким образом самим процессом теплоотдачи.

Очень часто для увеличения электропроводности и температуры факела в него добавляют легко ионизирующие вещества (соли щелочных металлов). Например. Приведена электро-газовая горелка следующих параметров:

Мощность	1 МВт;
Расход газа	60 м <sup>3</sup> /ч;
Рабочее напряжение	1.5 – 3.5 кВ;
Расход КС1	50 г/м <sup>3</sup> ;
Температура	2500-2600 <sup>0</sup> С.

### **5.7.1 Сжигание в камере сгорания МГД – генератора**

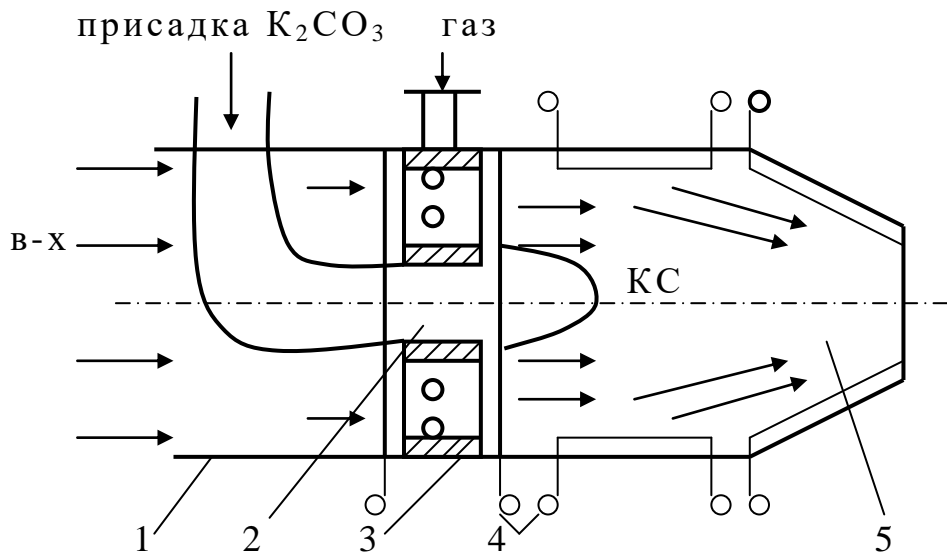
Высокотемпературное и высокоинтенсивное сжигание природного газа осуществляется в камере сгорания МГД – генератора.

Камера сгорания предназначена для выработки электропроводящей плазмы с температурой 2500-3000К, т.е. МГД - генератор на электростанции выполняет роль плазматрона. На рисунке 5.3 приведена схема камеры сгорания, работа которой осуществляется следующим образом.

В горелочное устройство 3 подается газ, горячий воздух и присадка. В качестве присадки используются  $K_2CO_3$  в количестве 1% по массе от продуктов сгорания. При этом обеспечивается электропроводность плазмы до 10 ом/м. Ввод присадки в пылевидном состоянии 30-90 мкм производится сжатым воздухом давлением  $P=1,8$  МПа. Присадка вводится в рециркулирующую струю для увеличения времени контакта поташа с горючими газами и сокращения време-

ни на его ионизацию.

При работе МГД – генератора в его канале возникает продольная ЭДС, которая достигает больших значений 20-40 кВ.



1 – воздухопровод; 2 – подвод присадки; 3 – горелочное устройство; 4 – система водяного охлаждения; 5 – сопло на входе в МГД – генератор.

Рисунок 5.3 – Конструктивная схема камеры сгорания МГД – генератора

Рассматриваемая камера сгорания имеет ряд особенностей:

- при сжигании природного газа в горячем воздухе ( $1200^{\circ}\text{C}$ ) время необходимое для образования плазмы составляет 30 мкс и лимитируется скоростью ионизирующейся присадки;
- в связи с высокой температурой горения топлива около 3000 К тепловые потоки достигают до  $3 \text{ МВт}/\text{м}^2$ , а тепловое напряжение объема составляет  $150-175 \text{ МВт}/\text{м}^3$ . Поэтому во избежание кризиса кипения элементы охлаждаются водой недогретой до кипения. Около 65% тепловых потерь воспринимаются кипящей водой с давлением 4-4.5 МПа, образующийся пар используется для нагрева питательной воды;

- высокая температура горения – источник образования окислов азота. Их концентрация достигает 1% по объему, что в 20-30 раз больше, чем при обычном способе. Для уменьшения окислов  $\text{NO}_x$  сжигают топливо с  $\alpha=0.85-0.9$ , что снижает концентрации окислов  $\text{NO}_x$  в плазме.

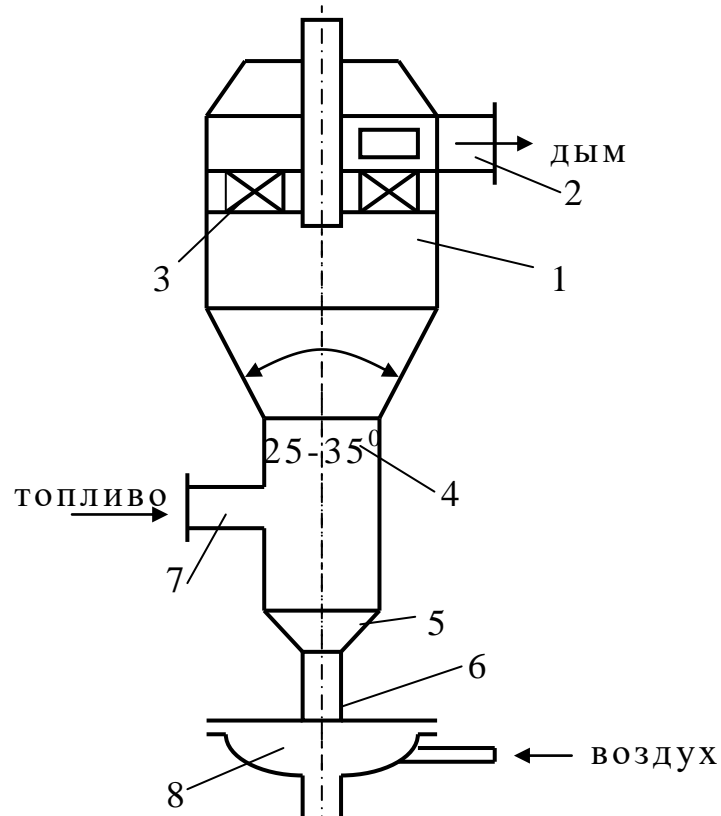
### **5.8 Использование низкочастотных пульсаций и акустических колебаний при горении топлива**

В последнее время для интенсификации процессов горения используют низкочастотные пульсации и акустические колебания для управления процессом сжигания топлива. При наложении пульсаций, интенсифицируют процессы смесеобразования, выравнивается температура факела по его оси, фронт пламени деформируется, скорость тепловыделения резко увеличивается.

Проведены исследования по установлению влияния акустических колебаний на работу газовых горелок. Установлено, что процесс горения в горелках интенсифицируется, длина факела сокращается, факел расширяется, раздваивается, как рыбий хвост. Кроме того установлено, что с ростом силы акустических колебаний понижается устойчивость горения к отрыву и увеличивается к проскоку. Частота колебаний на процесс горения и устойчивость факела влияния не оказывает. Наиболее перспективным является создание акустических газомазутных горелок, т.к. при применении акустических колебаний интенсифицируется распыление жидкого топлива и тем самым улучшается полнота его сжигания.

### 5.9 Циркулирующий кипящий слой

Процесс сжигания в циркулирующем кипящем слое осуществляется в аэрофонтанных топках (АФТ), разработанных энергетическим институтом им. Г.М. Кржижановского. АФТ представлена на рисунке 5.4.



1 – футерованная неохлаждаемая камера сгорания; 2 – выхлопной патрубок; 3 – стабилизатор горения; 4 – разгонная камера; 5 – конфузор; 6 – канал для подвода воздуха; 7 – подвод топлива; 8 – бункер.

Рисунок 5.4 – Схема аэрофонтанной топки

АФТ не содержит поверхностей нагрева, способных отводить выделяющуюся при горении топлива теплоту. Это связано с тем, что поверхности нагрева, размещенные в потоке циркулирующего абразивного материала, быстро истираются и выходят из строя. АФТ используют только для сжигания топлив с низкой теплотой сгорания, в основном остатков полукоксования сланцевой мелочи при ее перера-

ботке в жидкое и газообразное топливо.

При сжигании в АФТ топлив с относительно высокой теплотой сгорания свыше 14.5 МДж/кг необходимо проводить предварительную термическую обработку, целью которой является выделение из твердого топлива газообразного вещества при частичной газификации или высококислородной парогазовой смеси (ПГС) при полукоксовании, которые сжигаются в горелках котла, а твердый остаток (полукокс) дожигается в АФТ. Горючие продукты полного сгорания полукокса после обеспыливания сбрасываются в топку котла, где теплота их утилизируется. Изменением количества золы в полукоксе можно поддерживать его теплоту сгорания на необходимом уровне при теплоте сгорания исходного топлива в широких пределах.

Преимущества АФТ при сжигании низкосортного топлива следующие:

- существенно снижаются затраты энергии на подготовку топлива, упрощается ее схема;
- не требуется жидкое или газообразное топливо для стабилизации процесса горения, т.к. в топке котла сжигается ПГС с высокой теплотой сгорания в количестве 20-35% по теплоте;
- обеспечивается сжигание топлива в широком диапазоне изменения теплоты сгорания от 6 до 14 МДж/кг;
- выводится основная масса золы из потока продуктов сгорания, пылеугольного топлива с зольностью 8-12%. Отсутствует опасность зольного износа и шлакования поверхностей нагрева котла;
- обеспечивается работа котла на других видах топлива (природный газ, мазут).

### **5.10 Технология производства электроэнергии с использованием газификации угля в кипящем слое под давлением.**

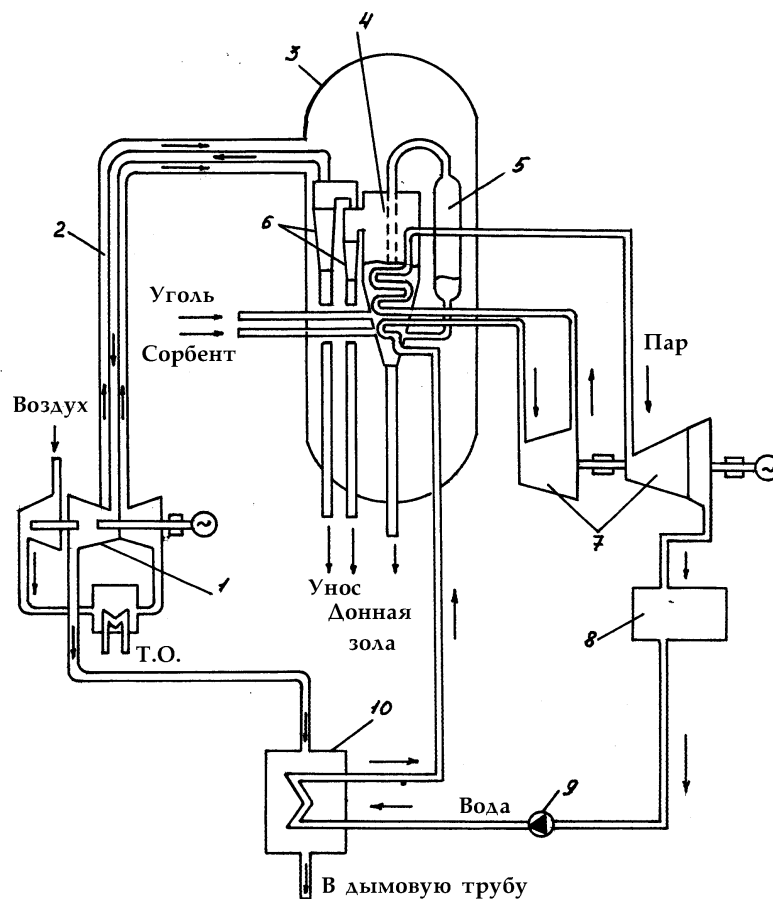
Признанным лидером в области разработки и применения в энергетике технологии пузырькового кипящего слоя под давлением (ПКСД) является фирма АВВ Carbon (Швеция). В ПКСД – технологии фирмы АВВ Carbon применяется парогазовый цикл с двумя рабочими телами: паром и воздухом.

Принципиальная схема ПКСД – технологии фирмы АВВ Carbon представлена на рис. 5.5. Атмосферный воздух поступает на вход компрессора низкого давления двухвальной газотурбинной установки 1. Пройдя промежуточный теплообменник (Т.О.), сжатый воздух поступает в компрессор высокого давления газотурбинной установки (ГТУ), затем по коаксиальному трубопроводу 2, нагреваясь в нем от горячих газов, направляющихся в газовую турбину по центральной части трубопровода и поступает в корпус высокого давления 3, где он используется для горения угля и ожижения материала слоя в ПКСД – топке 4, одновременно охлаждая узлы установки, расположенных в корпусе высокого давления. Уголь фракции 5 мм поступает в ПКСД – топку в виде пасты или с помощью пневмопитателя, в зависимости от качества твердого топлива. В кипящий слой поступает известняк или доломит для связывания серы.

В ПКСД – топке при давлении 1,2 – 1,6 МПа и температуре порядка 850 ... 870 °С происходит процесс горения и связывания серы топлива сорбентом, при этом используются глубокие слои 3-4 м. Эффективность горения достигает 95 ...98%.

Емкость хранения материала слоя (угля и сорбента) 5 предназначена для маневренного вывода материала из зоны кон-

такта с погружными поверхностями нагрева. Дымовые газы минуя двухступенчатый циклон 6, поступают в газовую турбину 1. Насыщенный пар с паротурбинной установки 7 поступает на



1 – газотурбинная установка; 2 – коаксиальный трубопровод; 3 – корпус высокого давления; 4 – КСД-топка; 5 – емкость хранения материала слоя; 6 – циклоны; 7 – паротурбинная установка; 8 – конденсатор; 9 – питательный насос; 10 – экономайзер.

Рисунок 5.5 - Упрощенная схема ПКСД-процесс фирмы АВВ Carbon

промперегрев перед входом на ступень турбины высокого давления. Далее, образованный конденсат в конденсаторе 8 поступает с помощью питательного насоса 9 на экономайзер 10.

Диапазон регулирования нагрузки ПКСД котла больше, а при пониженных нагрузках эффективность цикла повышается, так как при этом большую часть энергии вырабатывает газовая тур-



бина 1. Диапазон рабочих температур составляет 750...950°C. Верхняя температурная граница выбирается исходя из условий предотвращения размягчения золы и оптимальной рабочей температуры газа на входе газовой турбины.

При типичных параметрах пара 18,0 МПа, 540/540°C цикл ПГУ с ПКСД имеет КПД (нетто) около 42-44% (для низшей теплоты сгорания и температуры охлаждения воды 10°C). Это превышает КПД обычных тепловых станций с таким же паровым циклом примерно на 6 – 8 %.

Сравнительный анализ котлов кипящего слоя позволяет выделить ряд преимуществ при использовании последних. Это можно проиллюстрировать на данной технологии.

Используя расчетную универсальную формулу для определения критической скорости начала псевдооживления при среднем значении порозности неподвижного слоя  $\varepsilon=0,37...0,4$ .

$$Re_{кр} = \frac{v'd}{\nu} \quad (4)$$

где  $Re_{кр}$  – критическая величина критерия Рейнольдса;  $d$  – усредненный поверхностный диаметр с учетом коэффициента формы, м;  $v'$  – критическая скорость начала псевдооживления слоя, м/с;  $\nu$  – кинематическая вязкость газифицирующего агента (воздуха), м<sup>2</sup>/с.

Тогда при  $d=5 \cdot 10^{-3}$  м, и  $\nu$  воздуха при 20 °С, равной  $\nu=1,37 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с, с учетом удельного веса частиц и оживающего агента определяем критерий Архимеда.

$$Ar = \frac{g \cdot d^3 \cdot (\gamma_T - \gamma_B)}{\nu^2 \cdot \gamma_B} \quad (5)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения;  $\gamma_T$ ,  $\gamma_B$  – удельный вес соответственно твердых частиц и оживающего агента соответственно Н/м<sup>3</sup>.

Для данного случая  $Ar=6,7 \cdot 10^6$  и из номограммы соответствия критериев  $Re$  и  $Ar$  определяем  $Re_{кр}$ . Для данного случая  $Re_{кр}=5000$ , тогда из формулы (4)  $v'=13,7$  м/с.

При давлении ожижающего агента  $P_{изб} = 16$  ати скорость воздуха в слое составит  $v'_{16} = v' \frac{P_{атм}}{P_{атм} + P_{изб}}$ . Откуда фактическая скорость воздуха в слое  $v'_{16}=0,8$  м/с. Такое совпадение с расчетными данными  $v'=0,9$  м/с подтверждает правильность данных расчетов. Из этого также следует, что при порозности слоя  $\varepsilon=0,3$  скорость ожижающего агента атмосферного типа будет равна  $v_a=4,11$  м/с. Проведем удельные сравнения массовых расходов воздуха на  $1 \text{ м}^2$  поверхности слоя в том и другом случаях. В варианте кипящего слоя атмосферного типа это составит  $v_a \cdot \rho_v=4,11 \cdot 1,29=5,3$  кг/( $\text{м}^2 \cdot \text{с}$ ), а в случае  $P_{изб}=16$  ати это будет соответственно равно  $v' \cdot \rho_v=13,7 \cdot 1,29=17,7$  кг/( $\text{м}^2 \cdot \text{с}$ ).

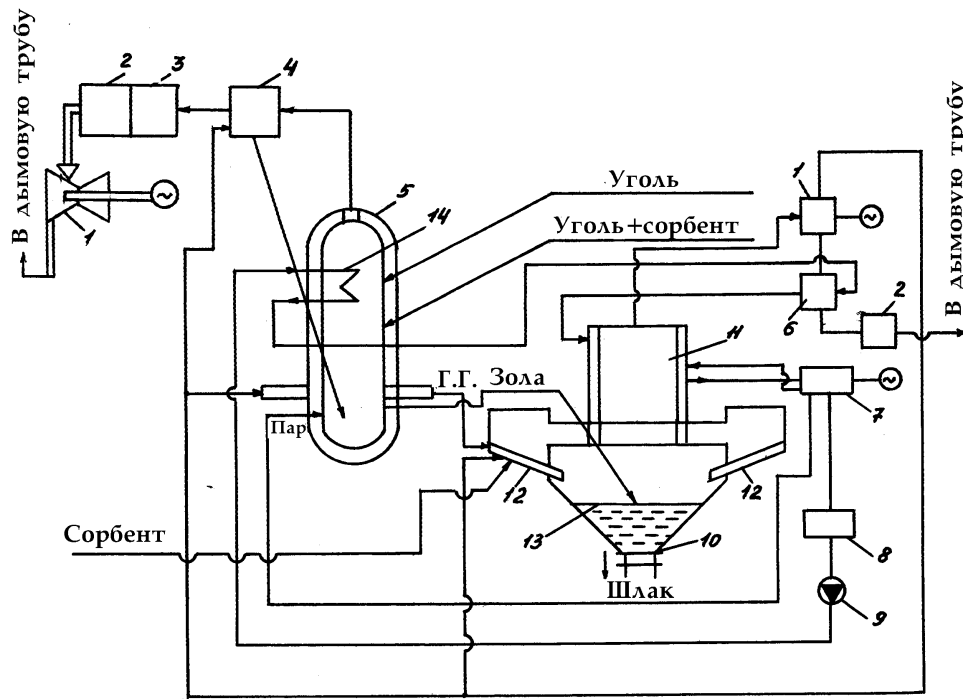
Отсюда наглядно видно, что удельная производительность сжигания угля по технологии ПКСД будет выше обычной атмосферной в  $17,7:5,3=3,3$  раза. В полной мере это относится и к габаритам установки, ее рабочей поверхности. При этом скорость дыма в слое соответственно будет ниже в  $4,11:0,8=5,1$  раза, и это приведет к пропорциональному уменьшению выноса пыли.

На рисунке 5.6 представлена принципиальная схема парогазовой установки (ПГУ) с ПКСД газификации угля.

Принципиальным отличием этой технологии является размещение агрегата с газификацией в ПКСД с сжиганием генераторных газов над поверхностью шлаковой ванны. Такая комбинация агрегатов позволяет увеличить эффективность сжигания угля, за счет исключения механического и химического недожога, а также уменьшения вредных выбросов, за счет рафинирующих

действий шлаковой ванны как от серы в топливе, так и от пыли (усвоение пыли зеркалом жидкой ванны).

Большим преимуществом является также то, что отпадает необходимость в золоотвалах и связанное с этим увеличение полезных площадей земли и уменьшение вредных выбросов в атмо-



1 – газотурбинная установка; 2 – рукавный фильтр; 3 – фильтр сероочистки; 4 – циклон; 5 – газификатор ПКСД; 6 – экономайзер; 7 – паротурбинная установка; 8 – конденсатор; 9 – питательный насос; 10 – клапан; 11 – пароперегреватель; 12 – горелки сжигания угольного газа в шлаковой ванне; 13 – шлаковая ванна; 14 – конвективный пучок.

Рисунок 5.6 – Принципиальная схема ПГУ с ПКСД сферу.

Согласно принципиальной схеме в газификаторе 5 в режиме ПКСД происходит газификация низкосортных углей, при которой часть топлива в кипящем слое сжигается (уголь + сорбент), а другая, большая часть 70 – 75% от общего потока угля нагревается в кипящем слое дымовыми газами сгоревшей первой части угля. При этом образующийся вынос угольной пыли возвращает-

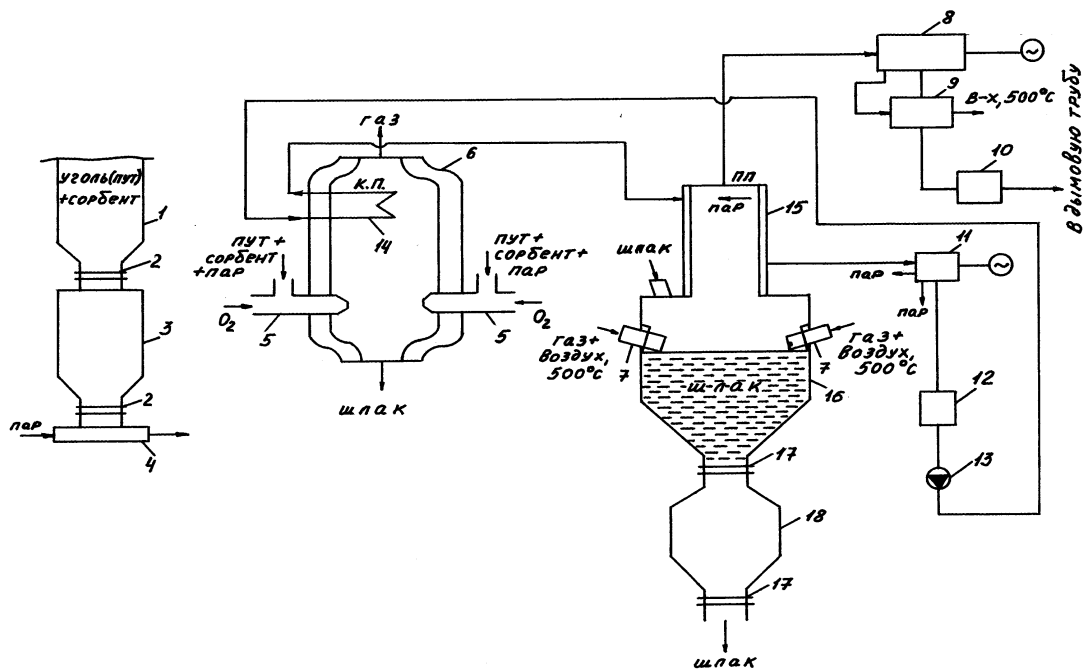
ся из циклона 4 воздушным дутьем в топку газификатора. Далее дымовые газы из циклона 4 попадают на фильтр сероочистки 3, представляющей железную руду фракции 10 –15 мм, в которой происходит восстановление  $H_2S$  и  $CO_S$ , а затем дымовые газы дополнительно очищаются в рукавном фильтре 2 и утилизируются газовой турбиной 1, в результате чего вырабатывается частично или электроэнергия или сжатый воздух для собственных нужд. Зола самотеком из газификатора 5 попадает в шлаковую ванну 13, на поверхности которой в горелках, расположенных над зеркалом шлаковой ванны сгорает генераторный газ, после чего дымовые газы поступают через пароперегреватель 11 в газотурбинную установку 1, с помощью которой вырабатывается электроэнергия и создается избыточное давление компрессорного воздуха, поступающего одновременно в газификатор 5, на горелки шлаковой ванны 12 и в циклон 4 на эжектор для транспортировки угольной пыли в топку газификатора на дожигание. В свою очередь выхлопные газы с газотурбинной установки 1 проходят через экономайзер 6 и далее через рукавный фильтр 2 поступают в дымовую трубу.

Питательный насос 9 конденсат с конденсатора 8 подает в конвективный пучок 14, установленный над поверхностью нагреваемого слоя угля газификатора и далее через экономайзер 6 и пароперегреватель 11 поступает на паротурбинную установку 7, с помощью которой вырабатывается электроэнергия, а пар с отборов турбины поступает в газификатор 5 для создания защитной завесы на выходе из шлаковой ванны 13. Накапливаемый шлак периодически выпускается с помощью специального клапана 10 и утилизируется в производстве шлакобетона или шлакоситала.

### 5.11 Технология производства электроэнергии с использованием газификации пылеугольного топлива

На рисунке 5.7 представлена принципиальная схема технологии производства электроэнергии с использованием газификации ПУТ, которая работает следующим образом

Угольная пыль и сорбент в потоке азота, полученного в установке разложения воздуха, подается пневматическим путем в



1 – приемный бункер; 2 – заслонки; 3 – расходный бункер; 4 – нагнетатель; 5 – горелочные головки; 6 – газификатор ПУТ; 7 – горелки дожига угольного газа; 8 – газотурбинная установка; 9 – воздухоподогреватель; 10 – рукавный фильтр (электрофильтр); 11 – паротурбинная установка; 12 – конденсатор; 13 – питательный насос; 14 – конвективный пучок; 15 – пароперегреватель; 16 – шлаковая ванна; 17 – клапан; 18 – шлакоприемник.

Рисунок 5.7 - Принципиальная схема технологии производства электроэнергии с использованием газификации ПУТ

угольный бункер 1, откуда с помощью заслонок 2 поступает в расходный бункер 3 и далее по определенной программе через заслонку 2 в нагнетатель 4, с помощью которого смесь подается

под давлением в горелочные головки 5. Туда же поступает и кислород или обогащенное воздушное дутье кислородом. Относительно низкие температуры и высокие скорости транспортирования (выше скорости воспламенения пылеугольно-кислородной смеси) надежно препятствуют проскоку пламени между смесительной головкой и горелкой.

Примерно половина золы в виде жидкого шлака стекает вниз по стенкам газификатора ПУТ 6 и выводится из нижней части в шлаковую ванну 16. Другая половина уносится с продуктовым газом в виде летучей золы и дожигается с помощью угольных горелок 7 над зеркалом шлаковой ванны 16. Такая комбинация агрегатов (6 и 16) позволяет увеличить эффективность сжигания угля за счет исключения механического и химического недожога, а также снизить величину вредных выбросов, за счет рафинирующих действий шлаковой ванны как от серы так и от пыли (усвоение пыли жидкой ванной).

Большим преимуществом такой технологии является также то, что отпадает необходимость в золоотвалах и связанное с этим уменьшение вредных выбросов в атмосферу и увеличение полезных площадей земли.

Дымовые газы после дожигания угольного газа попадают через паровую завесу в пароперегревателе 15 на газотурбинную установку 8, после чего выхлопные газы поступают в воздухонагреватель 9 и минуя рукавный фильтр (электрофильтр) поступают в дымовую трубу.

В свою очередь конденсат с паротурбинной установки 11 поступает в конденсатор 12 и с помощью питательного насоса попадает в конвективный пучок 14 в газификаторе 6, затем полученный пар попадает в пароперегреватель 15 и из него в паротурбинную установку 11. Шлак из шлаковой ванны 16 периодически

удаляется из шлакоприемника 18 с помощью специальных клапанов 17.

Таким образом предложена схема с встроенным котлом-утилизатором в схему газификации и дожигания. При этом по такой схеме выработанный пар встроенным котлом-утилизатором поступает параллельно потоку пара, вырабатываемого основным котлом энергоблока. Этим достигается увеличение производительности паротурбинной установки и в целом энергоблока. В свою очередь работа газотурбинной установки также позволяет увеличить мощность энергоблока, особенно в случае пониженных нагрузок на основной энергоблок.

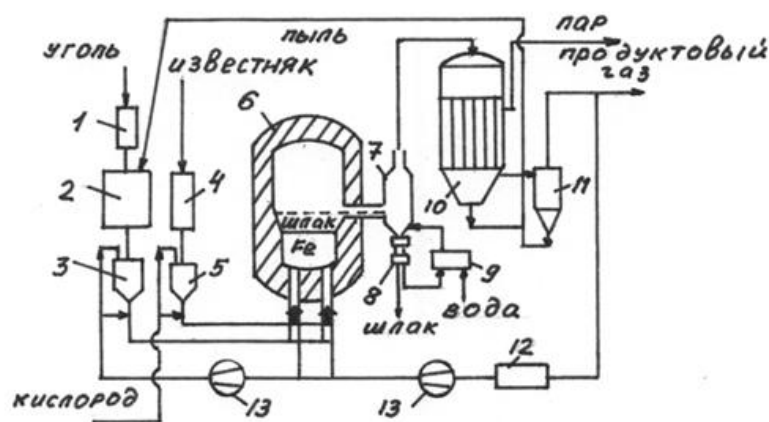
Отсюда видно преимущество такой технологии производства электроэнергии, при которой малая нагрузка обеспечивается работой ТЭС, представленной на рис 5.7, а в случае необходимости увеличения мощности с увеличением нагрузки – параллельная работа двух пылеугольных ТЭС (одна из которых парогазовая).

### **5.12 Перспективы использования в металлургии и теплоэнергетике технологий газификации угля в расплаве шлака.**

Технология газификации угля в расплаве шлака для последующего сжигания синтез - газа в котле – утилизаторе исследована на промышленных аналогах – металлургических печах жидкофазного восстановления железа (ПЖВ). Такие печи различной конструкции эксплуатируются на различных заводах России (Рязанский опытно-экспериментальный завод, Новолипецкий металлургический комбинат).

Зарубежным аналогом таких печей является схема Гумбольдт – процесса, представленная на рисунке. 5.8. Как стало из-

вестно. компания «КГД Гумбольдт Ведач АГ» ведет строительство опытной установки с производительностью по углю 10 т/ч и рабочим давлением 10 бар.



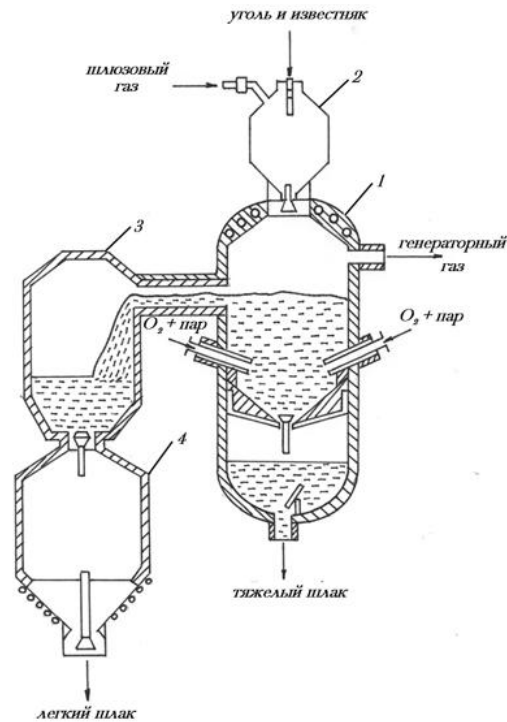
1-3 – углеподготовка; 4-5 – подготовка известняка; 6 – газогенератор; 7 – разделительная камера с грануляцией шлака; 8 – затвор; 9 – подготовка воды; 10 – котел- утилизатор; 11 – циклон; 12 – охлаждение и очистка газа; 13 – компрессор.

Рисунок 5.8 – Схема Гумбольдт процесса

На рис. 5.9 представлена аналогичная схема газификации угля в расплаве шлака с подачей в горелки смеси кислорода и пара, подаваемой через боковые фурмы. В данном варианте решена проблема удаления легких и тяжелых шлаков, величина и соотношение которых определяется углем и выбранным шлаковым режимом (его основностью). На рисунке 5.10 представлены изотермы вязкости шлаков при различной их основности по отношению  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$ .

Из полученных данных видно, что пригодным для ведения процесса являются шлаки, находящиеся в интервале основности 0,5...1,5 при температуре расплава 1450...1650 °С.





1 – газификатор; 2 – узел загрузки; 3 – накопитель легкого шлака; 4 – гранулятор легкого шлака.

Рисунок 5.9 – Схема газификации угля в расплаве с разделением шлака

Вязкость при этом будет находится в интервале  $0,2...1 \text{ Па}\cdot\text{с}$ , что отвечает технологическим требованиям к шлаковому режиму, обеспечивающему надежность слива по такой технологии. Образующаяся в расплаве газо-жидкостная эмульсия обеспечивает идеальные условия тепломассообмена и контакта топлива с окислителем, а также относительно высокий уровень температур, что в комплексе способствует практически полной газификации углей, в том числе низкого качества. Процесс протекает в районе температур  $1500 \text{ }^\circ\text{C}$ . Наличие восстановительной атмосферы в рабочем пространстве расплава способствует совместно с идеальным смешением топлива и окислителя эффективному восстановлению окислов азота, выход которых не превышает  $150 \text{ мг/м}^3$ . Подача рядового топлива совместно с известняком способствует связыванию  $90 \%$  серы топлива и низкому содержанию оксидов

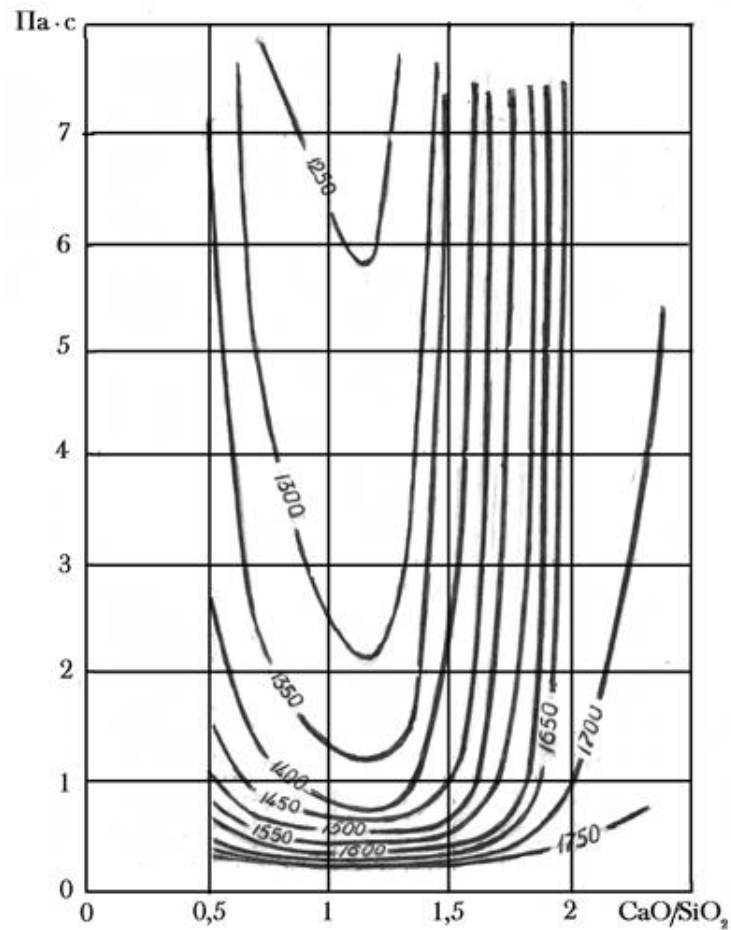


Рисунок 5.10 – Изотермы вязкости шлаков при различной основности  $\text{CaO/SiO}_2$

серы в дымовых газах.

Основу математической модели расчета таких газогенераторов составляют уравнения материального и теплового балансов:

$$\begin{cases} G_{\text{дутья}} + G_{\text{угля}} + G_{\text{CaCO}_3} = G_{\text{шл}}^{\text{T}} + G_{\text{шл}}^{\text{Л}} + G_{\text{газ}} \\ Q_{\text{хим}} + Q_{\text{физ}} = \sum_{i=1}^n Q_{\text{пот}} \end{cases}, \quad (6)$$

где  $G_{\text{дутья}}$ ,  $G_{\text{угля}}$ ,  $G_{\text{CaCO}_3}$  - массовые расходы дутья, угля и известняка соответственно;

$G_{\text{шл}}^{\text{T}}$ ,  $G_{\text{шл}}^{\text{Л}}$ ,  $G_{\text{газ}}$  - массовые расходы шлаков (тяжелого, легкого) и газов;

$Q_{\text{хим}}, Q_{\text{физ}}$  - приходная часть физической и химической теплоты реагирования соответственно;

$Q_{\text{пот}}$  - расходная часть тепла, включая различные виды потерь.

Как показали расчеты использование угля с высоким содержанием балласта приводит к трудностям сохранения теплового баланса процесса газификации угля в расплаве шлака. Кроме этого это экономически невыгодно. Кроме того степень обогащения дутья кислородом при прочих равных условиях определяет область использования газификации угля в расплаве шлака. Считается экономически целесообразным обогащение воздуха кислородом в теплоэнергетике – 27%, в черной металлургии – 80%.

## 6 ЗАЩИТА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ОТ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ТОПЛИВА

Угроза загрязнения окружающей среды стала настолько реальной и опасной, что во многих странах образованы специальные правительственные органы – государственные комитеты (ГК).

Ежегодный мировой выброс вредных веществ в атмосферу составляет более 700 млн.т. (в том числе CO – 300 млн.т., SO<sub>2</sub> – 150 млн.т., NO<sub>x</sub> – 50 млн.т., C<sub>m</sub>H<sub>n</sub> – коксовая частица и сажа 90 млн.т.).

Основным источником загрязнения воздушного бассейна являются вредные для здоровья людей вещества – токсогены, которые образуются при сжигании топлива и находятся в продуктах горения. Эти вещества отравляюще действуют на людей, животный и растительный мир, непосредственно или косвенно, поглощая коротковолновое солнечное излучение. Кроме того эти вещества пагубно действуют на стройматериалы, здания и т.д. Необходимо отметить, что скорость коррозии стали в промышленном районе в 20 раз больше, чем в сельскохозяйственном, алюминия в 100 раз.

Вредные компоненты в дымовых газах при сжигании топлива:

1. Зола, твердые несгоревшие частицы топлива, сажа и другие примеси.
2. Окислы серы SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>.
3. Окислы азота NO<sub>x</sub>.
4. Газообразные продукты неполного горения: окись углерода, формальдегид, бензпирен, углеводороды и др.
5. Окислы металлов и ряд других веществ.

Основными источниками загрязнения являются:

1. ТЭС (тепловые электрические станции).
2. Промустановки.
3. Бытовые установки.
4. Транспорт (около 50% от всех выбросов).

Основными источниками окислов серы являются тепловые электростанции. Источником азота (окислов) является природный газ. Как правило все промпредприятия, использующие топливо, являются источниками загрязнения окружающей среды: коксохимзавод -  $C_mH_n$ , бензпирен; металлургические заводы -  $NO_x$ ; заводы цветных металлов -  $SO_2$ ,  $CO$ ,  $MeO_x$ ; цементные заводы -  $SO_2$ ,  $SiO_2$ .

Рассмотрим действие на организм некоторых вредных веществ. Природный и сжиженный газы сами по себе не ядовиты. Удушающее их действие на организм при больших концентрациях уменьшает содержание кислорода в воздухе.

Искусственные газы (доменный и коксовый) содержат окись углерода и являются ядовитыми.

**Метан:**  $CH_4$  без цвета и запаха. Плотность метана меньше плотности воздуха.

$$\rho_{CH_4} = \frac{12 + 4}{22.4} = 0.66 \frac{кг}{м^3}; \quad \rho_{в} = \frac{29}{22.4} = 1.29 \frac{кг}{м^3} \quad \rho_{CH_4} < \rho_{в}$$

$$t_{в\text{оспл}} = 650-850^{\circ}C, \text{ пределы взрываемости } 5-15\%.$$

Длительное вдыхание воздуха, содержащего метан, вызывает головную боль.

**Пропан и бутан** ( $C_3H_8$ ,  $C_4H_{10}$ ) не ядовиты, плохо смешиваются с воздухом. При их содержании в воздухе примерно 1% при кратковременном пребывании не вызывает отравления. При концентрации их в воздухе более 10% вызывают головокружение. Наи-

большую опасность представляют продукты горения:  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$ , бензпирен ( $\text{C}_{20}\text{H}_{12}$ ), окислы  $\text{NO}_x$  ( $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ).

**NO** – безцветный газ, сильный яд, действует на кровь и нервную систему. Плотность окислов азота больше воздуха

$$\rho_{\text{NO}_x} = \frac{14 + 16(32)}{22.4} > \rho_{\text{в}}$$

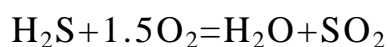
**NO<sub>2</sub>** – бурого цвета, раздражает дыхательные пути, вызывает отек легких.

**CO** – газ без цвета и запаха.  $\rho_{\text{CO}} = \frac{12 + 16}{22.4} \approx \rho_{\text{в}}$

Окись углерода – обязательная составляющая всех искусственных газов. Сильный яд при вдыхании связывает гемоглобин в крови в прочные соединения и вызывает удушье. Концентрация 0,5% его в воздухе при вдыхании которого через 20 минут наступает смертельное отравление.

**CO<sub>2</sub>** – является продуктом полного горения топлива, без цвета и запаха, кисловатая на вкус, не ядовита, но обладает наркотическими свойствами. Раздражает слизистую оболочку и кожу. Допускается концентрация до 0,1% в воздухе.

**H<sub>2</sub>S**. Сероводород опасен как сам по себе, так и продукты его горения:



Бесцветный газ с сильным запахом тухлых яиц. Сильный яд действует на нервную систему, раздражает дыхательные пути и глаза. При нахождении в помещении с концентрацией 0,02% через 5-8 минут появляется сильное раздражение глаз и слизистой оболочки. При вдыхании воздуха, содержащего 0,5-0,7% сероводорода в течение одного часа появляется сильное отравление. Концентрация 0.1%- смертельный исход.

**SO<sub>3</sub>** – серный ангидрид. Бесцветная жидкость. Во влажном воздухе

образует туман серной кислоты. Раздражает дыхательные пути.

$\text{SO}_2$  – сернистый ангидрит. Бесцветный газ, раздражает дыхательные пути, нарушает обменные процессы в организме. При содержании его равном 0,001% в воздухе вызывает раздражение горла, кашель, а при концентрации в воздухе 0,05% создается опасность для жизни.

$\text{НСОН}$  – формальдегид. Бесцветный газ с запахом, раздражает слизистую оболочку.

$\text{C}_{20}\text{H}_{12}$  – бензпирен. Желтое кристаллическое вещество. Сильный яд. Один из самых опасных канцерогенов. Образуется при горении низкомолекулярного топлива и при разложении в процессе сжигания высокомолекулярных топлив.

Вредные вещества по степени воздействия на организм делят на 5 групп:

первая – чрезвычайно опасные, вторая – высокоопасные, третья – умеренно опасные, четвертая – малоопасные, пятая – безопасные.

Классификация вредных веществ по опасности и предельно допустимые концентрации приведены в таблице 6.1.

Критерием санитарной очистки среды является предельно допустимая концентрация (ПДК) вредных веществ в воздухе или в воде. ПДК – это концентрация вредных веществ, которые при ежедневном воздействии в течение длительного времени на организм человека не вызывает патологических изменений или заболеваний.

Для санитарной оценки среды используют следующие показатели: **ПДК рабочей зоны** – предельно допустимая концентрация вредных веществ в воздухе рабочей зоны, которая не должна вызывать у работающих при ежедневном вдыхании в течение 8 часов на протяжении всего рабочего стажа заболеваний или от-

клонений в здоровье. Рабочей зоной считают пространство высотой 2 м от пола и площадка рабочего места.

Таблица 6.1 – Класс опасности и ПДК некоторых веществ, мг/м<sup>3</sup>

Вещество	Класс опасности	В населенных пунктах		В рабочей зоне при ежедневном 8 <sup>и</sup> часовом рабочем дне
		Максим. разовая	Средне-суточная	
C <sub>20</sub> H <sub>12</sub>	1	-	0.1 10 <sup>-5</sup>	0.00015
NO <sub>2</sub>	2	0.085	0.085	5
H <sub>2</sub> S	2	0.08	0.008	10
SO <sub>3</sub>	2	0.3	0.1	1.0
H <sub>2</sub> CO	2	0.035	0.012	0.5
SO <sub>2</sub>	3	0.5	0.05	10
CO	4	3	1	20

**ПДК среды** – концентрация вредных веществ в воздухе населенных мест, которая не должна оказывать вредного влияния на людей, прямо или косвенно, в условиях долгого круглосуточного дыхания.

В атмосфере установлены следующие предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе, мг/м<sup>3</sup>: CO – 1; SO<sub>2</sub> – 0.05; NO<sub>x</sub> – 0.085; C<sub>20</sub>H<sub>12</sub> – 0.1·10<sup>-5</sup>;

**ПДК максимально разовая** – максимально разовая концентрация, которая не должна вызывать рефлекторных реакций в организме.

В США ПДК измеряют не в мг/м<sup>3</sup>, а в долях на 1 млн. частиц воздуха. Так, содержание двуокиси азота NO<sub>2</sub> в воздухе в количестве 1г/м<sup>3</sup> равно 500 промилей (ppm).



При одновременном содержании в воздухе нескольких вредных веществ происходит их усиленное воздействие на организм. В этом случае сумма токсичных кратностей не должна превышать единицы. Концентрация вредных веществ в воздухе в этом случае равна:

$$\frac{C_1}{\text{ПДК}_1} + \frac{C_2}{\text{ПДК}_2} + \dots + \frac{C_n}{\text{ПДК}_n} \leq 1$$

где  $C_1, C_2, C_n$  – концентрации вредных веществ;

$\text{ПДК}_1, \text{ПДК}_2, \text{ПДК}_n$  – их предельно допустимые концентрации.

### 6.1 Мероприятия по снижению загрязнения окружающей среды

Проблема загрязнения окружающей среды должна решаться следующими путями:

1. Минимизация образования вредных компонентов внутри основного технологического процесса. Этого можно достичь следующим путем:
  - очисткой или обогащением топлива перед сжиганием. Так например: очистка природного газа от  $\text{H}_2\text{S}$ , десульфурация жидкого и твердого топлива, уменьшение зольности;
  - полного сжигания топлива. Совершенствование топливосжигающих веществ, улучшение смесеобразования топлива с воздухом;
  - подавления образования вредных веществ при сжигании топлива, т.е. применение катализаторов или создание условий, неблагоприятных для образования вредных веществ (понижение температуры, сжигание топлива с  $\alpha=1$ ).
2. Максимальное улавливание вредных веществ аппаратами очистки продуктов горения перед их выбросом в атмосферу.

Абсолютную полноту сжигания топлива достичь нельзя, даже при хорошей организации сжигания. Кроме того, продукты

неполного горения топлива могут находиться в отходящих газах по технологическим причинам (безокислительный нагрев, восстановительные процессы и т.д.). В продуктах сгорания при выходе их из рабочего пространства печи почти всегда могут находиться вредные компоненты. В связи с этим перед выбросом продуктов горения в атмосферу их необходимо очистить: установкой фильтров (улавливание твердых частиц, сажи, пыли); отмывкой вредных примесей; дожиганием; улавливание вредных веществ химическим путем.

3. Рациональное рассеивание тех вредных примесей, которые попали в атмосферу (увеличение высоты дымовых труб).

Очень часто очистку отходящих газов осуществляют переводом одного вида отходов в другой (например: газообразный в твердый; твердый в жидкий; жидкие в газообразные). В результате этого загрязненными оказались воздух, вода и почва.

4. Наиболее рациональным решением проблемы является разработка новой «чистой» технологии в отношении выбросов в окружающую среду.

Вопросы защиты окружающей среды должны решаться комплексно и совместно с теплотехниками и технологами. При разработке новых технологий необходимо придерживаться следующих принципов:

1. Повышение КПД тепловых установок.
2. Эффективное использование всех составляющих перерабатываемого сырья (безотходная технология).
3. Высокая степень использования вторичных энергоресурсов.
4. Создание комбинированных технологических процессов с энергетическим, с использованием отходов технологической переработки.

5. Комбинирование технологических процессов с энергетическими должно осуществляться таким образом, чтобы исключить или довести до минимума вредные выбросы в атмосферу. Небольшой недожог не так опасен, т.к. по мере выхода продуктов горения в атмосферу они дожигаются из-за подсоса воздуха.

В связи с этим основными вредными компонентами являются окислы серы и азота. Окислы серы образуются при сжигании сернистого твердого и жидкого топлив, а окислы азота в основном при сжигании газа.

Оренбургская, Татарская и Башкирская нефть этих районов содержит до 3% серы. При переработке сернистой нефти 90% серы переходит в мазут, поэтому сжигание сернистых мазутов загрязняет окружающую среду окислами серы.

В связи с этим перед сжиганием таких мазутов их подвергают десульфурации, которую производят следующими методами:

1. В процессе переработки нефти на нефтеперерабатывающих заводах.
2. Путем ввода специальных присадок в топливо перед его сжиганием.
3. Очистка продуктов горения от окислов серы перед выбросом их в атмосферу.
4. Получение из сернистых мазутов бессернистых газов.

Десульфурация сернистой нефти на нефтеперерабатывающих заводах обходится дорого т.к. это связано с применением водорода,  $H_2$ . Стоимость переработки такой нефти увеличивается на 20-25 грн/т.

В качестве официальных присадок применяют соединения магния, которые связывают окислы серы. Так, в Англии получение серы осуществляется путем поглощения окислов серы метал-

лами, а в США осуществляют мокрую очистку продуктов горения с использованием извести.

Все эти способы сложные, дорогие, имеют небольшой срок службы этих установок. Поэтому более перспективным являются методы предварительной переработки жидкого топлива. Например: газификация сернистого мазута под давлением или термическое разложение (пиролиз) жидкого топлива, с последующей газификацией получающегося нефтяного кокса.

Высокосернистый мазут подвергают газификации под давлением до 1 МПа при  $t=1300^{\circ}\text{C}$  путем неполного его сжигания с  $\alpha=0,4-0,45$ . при этом мазут почти полностью превращается в газ, а сера получается в виде  $\text{H}_2\text{S}$ , который поглощается раствором с последующим выделением и получением элементарной серы. Это снижает затраты.

Недостатком схемы является то, что при этом газ имеет низкую теплоту сгорания  $4,5 \text{ МДж/м}^3$ , сложность установки, малая ее стойкость из-за высокого давления ( $P=1\text{МПа}$ ) и наличия агрессивных сернистых соединений.

Более свободной от вышеперечисленных недостатков является схема пиролиза жидкого топлива. Рассмотрим пиролиз мазута с твердым теплоносителем. Сущность процесса заключается в том, что мазут нагревают до температуры  $800-900^{\circ}\text{C}$  раскаленным нефтяным коксом и происходит его разложение с образованием жидких, газообразных и твердых продуктов. При этом сера получается в виде  $\text{H}_2\text{S}$ , который удаляется способом отмывки. Полученный газ с теплотой сгорания  $10-12 \text{ МДж/м}^3$  может быть использован как топливо или продукт для получения водорода. Образовавшиеся жидкие продукты используют для повторной газификации.

фикации или в виде готовой продукции, а кокс используют для осуществления процесса пиролиза.

Процесс сжигания топлива – источник выброса в атмосферу вредных веществ, которые образуются при всех температурах процесса горения жидкого топлива. Достаточно высокая температура  $t=1800-2000^{\circ}\text{C}$  и наличия свободного азота является хорошей предпосылкой для образования окислов азота. Особое внимание при сжигании топлив следует обращать на конечные продукты реакции, покидающие топливоиспользующие установки и на состав полных и неполных продуктов сжигания его. В таблице 6.2 дана классификация продуктов сжигания топлива.

Таблица 6.2 – Классификация продуктов сжигания топлива

Наименование	Продукты сгорания топлива	
	Неполного	Полного
Углерод топлива, С	СО	СО <sub>2</sub>
Азот топлива и дутья, N	NO	NO <sub>2</sub>
Сера топлива, S	H <sub>2</sub> S	SO <sub>2</sub> , SO <sub>3</sub>
Водород топлива, H	ОН, H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
Метан, CH <sub>4</sub>	СО, C <sub>20</sub> H <sub>12</sub>	СО <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O

Углеводороды дающие при неполном горении вредные выбросы СО и C<sub>20</sub>H<sub>12</sub> при полном сжигании образуют безвредные продукты сгорания топлива СО<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O. Борьба с вредными продуктами, образующимися из серы и химически связанного азота топлива, решается путем улавливания и подавления образования опасных веществ в процессе горения.

Черная металлургия после энергетики, химической промышленности и транспорта – одна из основных источников загрязнителей окружающей среды. В зависимости от технологического процесса, рода сырья и топлива, режима ведения процесса, агрегаты выбрасывают в атмосферу: механическую пыль и аэрозольные частицы, токсичные газы (сернистый ангидрид, окислы азота, окись углерода, сероводород, цианистый водород, фтороводород и др.). Концентрация пыли в выбросах металлургических заводов достигает 50-120 кг/т.стали. Пыль, выбрасываемая мартеновскими печами, содержит мелкодисперсные частицы размером менее 20 мкм, а также токсичные вещества (свинец, цинк, хром, кремнезем, фториды и др.).

Газообразные выбросы металлургических заводов составляют около 2500 м<sup>3</sup>/т.стали. Источником сернистых соединений является кокс (40-60%), руда (5-30%). В процессе плавки со шлаком удаляется 45-55% серы. В металл переходит около 6% серы, а остальное количество выбрасывается в атмосферу.

Количество окислов азота образующихся в доменных, мартеновских и нагревательных печах и других промышленных установках, приведены в таблице 6.3.

Мероприятия по снижению выбросов окислов азота металлургическими тепловыми агрегатами связаны главным образом с развитием методов очистки уходящих газов.

## **6.2 Влияние рециркуляции продуктов сгорания и ступенчатого сжигания топлива на образование окиси азота**

Рециркуляция продуктов сгорания в топочном или рабочем объеме теплового агрегата (возврат газов к начальному участку факела) является эффективным методом снижения образования

окислов  $\text{NO}_x$ . Влияние рециркуляции на содержание окислов азота связано с изменением температуры и концентрации кислорода и азота в зоне реакции, а также времени пребывания их в зоне высоких температур, т.е.  $\text{NO}_x=f(T, C_{\text{O}_2}, C_{\text{N}_2})$ .

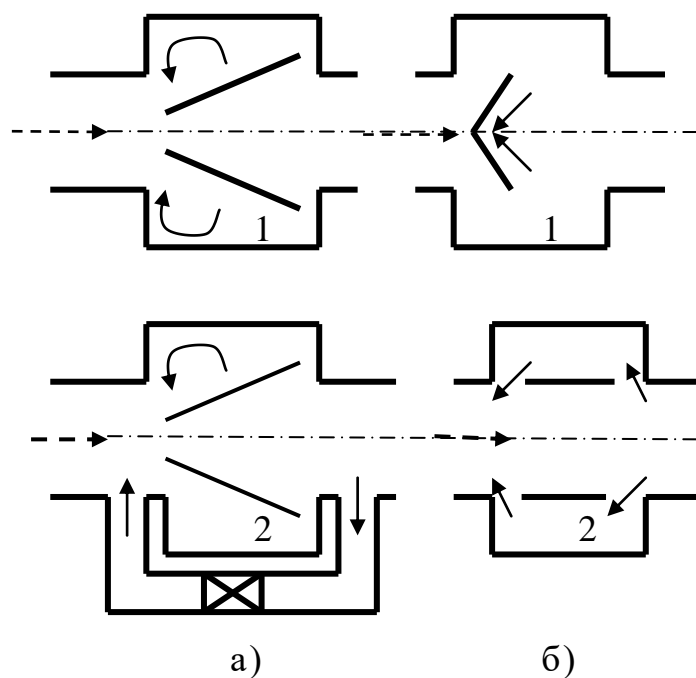
Таблица 6.3 – Содержание окислов азота в уходящих газах различных агрегатов

Агрегат	Концентрация			
	Средняя		Максимальная	
	%	мг/м <sup>3</sup>	%	мг/м <sup>3</sup>
1	2	4	5	6
Доменные воздухоподогреватели	0.004	8	0.0077	14
Мартеновские печи:				
без кислорода	0,029	580	0,07	1400
с кислородом	0,098	1960	0,244	4880
Нагревательные печи	0,025	500	-	-
Вагранки	0,001	20	0,003	60
Установки кипящего слоя	0,03	600	0,04	800
Паровые котлы	0,058	1160	0,1	2000
Газотурбинные установки	0,01	200	0,02	400

Рециркуляция продуктов сгорания в промышленных топках осуществляется двумя способами (рисунок 6.1).

Путем естественной рециркуляции, обусловленной образованием обратного потока дымовых газов при организации вне-

запного расширения вытекающей в топочный объем топливо-воздушной струи или при установке в высоко скоростном потоке плохо обтекаемого тела, и искусственной рециркуляции с помощью отсасывающего или нагнетающего устройства.



1 – естественная рециркуляция; 2 – механическая рециркуляция;  
 ←--- - газозвудушная смесь; ←— - продукты сгорания.

Рисунок 6.1 – Технические способы внешней (а) и внутренней (б) рециркуляции продуктов сгорания в топке

Естественная рециркуляция существенно влияет на тепло-технические характеристики факела: степень черноты, тепловыделение, стабильность, продолжительность горения, распределение температурных, скоростных и концентрационных полей. При естественной рециркуляции вследствие интенсификации процесса горения улучшается выгорание вредных веществ органического происхождения (окиси углерода, бензпирена, сажистых частиц), а вследствие выравнивания температурных полей в факеле и устранения температурных неоднородностей снижается концентрация



$\text{NO}_x$  в уходящих дымовых газах.

Искусственная рециркуляция воздействует главным образом на уровень температур в зоне реакции горения, с чем и связано ее влияние на образование окиси азота.

Разработан способ отопления промышленных печей с рециркуляцией продуктов сгорания. При этом дымовые газы в количестве 30-40% подают в печь, обогащая их до 21% по объему кислорода, а воздух подают в количестве 60-70% от необходимого на сжигание топлива. Данный способ позволяет увеличить коэффициент использования тепла топлива в печи на 12-16%, создать равномерное температурное поле в рабочем пространстве печи, снизить расход условного топлива на 4 кг, уменьшить вероятность образования окислов  $\text{NO}_x$ .

Содержание окислов  $\text{NO}_x$  в продуктах горения зависит от температуры, времени пребывания продуктов горения в зоне высоких температур, от соотношения концентраций азота и кислорода,  $\frac{N_2}{O_2}$ .

В начале при горении образуется окисел  $\text{NO}$ , который переходит в  $\text{NO}_2$ , а частично в  $\text{N}_2\text{O}_4$  на открытом воздухе под действием солнечных лучей. Окисление  $\text{NO}$  в  $\text{NO}_2$  ускоряется под действием озона атмосферы. Окись азота – малоактивное соединение, растворимость его в воде на 3 порядка ниже, чем  $\text{SO}_2$ .

Очистка продуктов горения от окислов азота технически сложная задача, трудно осуществима и экономически нерентабельна. Поэтому усилия специалистов направлены на снижение образования окислов азота в процессе горения топлива. Количество окиси азота снижается при уменьшении температуры горения и при сокращении времени пребывания азота и кислорода в зоне высоких температур. Это может быть достигнуто путем сту-

пенчатого подвода воздуха по длине факела. При этом двухступенчатое сжигание газа с  $\alpha=0,7-0,8$  на первой стадии (ступени) снижает образование окислов азота в 2-2,5 раза по данным американских авторов. Зависимость образования окислов азота от коэффициента расхода воздуха приведена на рисунке 6.2. По данным института газа, рекуперативный нагрев воздуха до  $300^{\circ}\text{C}$  увеличивает образование окислов азота в 2 раза. При беспламенном сжигании газа, образование окислов азота снижается (нет избытка кислорода т.к.  $\alpha=1,08$ ).

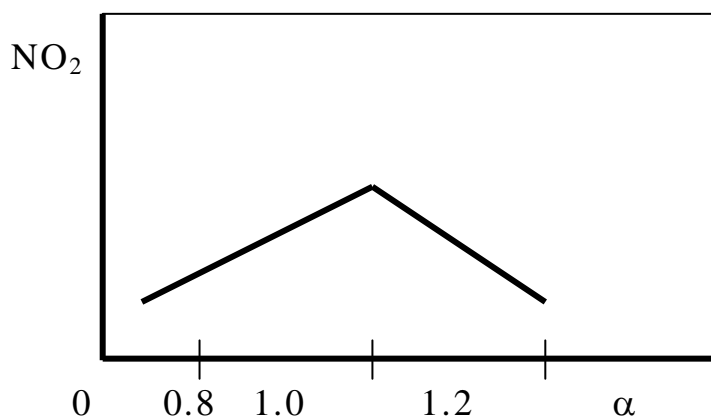


Рисунок 6.2 - Зависимость окислов азота от коэффициента расхода воздуха

При охране атмосферы воздуха необходимо учитывать следующее:

1. Требования об установлении нормативов предельно допустимых выбросов загрязнения вредными веществами атмосферы.
2. Совокупность всех выбросов не должна превышать установленной нормы.
3. В случае невозможности уменьшения выбросов вредных веществ в атмосферу предприятие или установки закрываются или их производственный профиль изменяется.

Контроль за уровнем загрязнения среды возложен непосредственно на общегосударственную службу, которая должна систематически контролировать и прогнозировать уровень загрязнения

и информировать заинтересованную организацию. Такой организацией является санэпидемстанция, которая в своей деятельности руководствуется законом об охране атмосферы воздуха и положением о государственном саннадзоре, которая имеет право: наложить штраф на виновников, вызвать на комиссию в облисполком, приостановить эксплуатацию предприятия, приостановить строительство нового объекта без очистных сооружений, производить выборочный контроль эксплуатации, строительства промышленных объектов.

При разработке технических проектов и технико-экономических обоснований при стоимости объекта до 3 млн. грн. необходимо согласование с санэпидемстанцией, а при стоимости свыше 3 млн. грн. нужно согласование с Минздравом Украины. Контроль за состоянием воздушной среды регулируется типовым положением по организации контроля воздушной среды на подконтрольных госгортехнадзором Украины объектах с химическими процессами. Этим положением предусматривается:

1. На каждом предприятии создаются специальные лаборатории, занимающиеся контролем атмосферного воздуха.
2. Назначение ответственных лиц контролирующих загрязнения окружающей среды.
3. Выделение ответственных лиц для отбора и анализа проб воздуха.
4. На каждом предприятия должна быть разработана инструкция по контролю воздушной среды с учетом специфики и по ГОСТам (12.1.005-76 – воздух рабочей зоны, 12.1.-7-76 – класс опасности вредных веществ).

В основных направлениях по развитию народного хозяйства предусмотрен специальный раздел «Охрана природы», в котором указывается необходимость совершенствования технологических

процессов и транспортных средств, с целью сокращения выбросов вредных веществ в окружающую среду и улучшения очистки отходящих газов от вредных примесей путем совершенствования государственного управления и усиления контроля в области охраны окружающей среды.

Для безопасного использования газов необходимо руководствоваться следующими правилами:

1. Горючие газы не терпят пренебрежения к себе.
2. Техника безопасности на предприятиях регулируется «Правилами безопасности в газовом хозяйстве».

Правила техники безопасности обязательны для всех министерств и ведомств, и организаций, кроме заводов черной металлургии. Для заводов черной металлургии существуют специальные правила безопасности в газовом хозяйстве. Горючие газы, кроме  $H_2S$ , бесцветны и не имеют запаха, поэтому для облегчения обнаружения их утечки они одоризируются, т.е. к ним подмешивают специальные жидкости с сернистыми соединениями. Запах одоранта должен чувствоваться при содержании газа в воздухе ниже 1/15 нижнего предела взрываемости (для природного газа). Пределы взрываемости некоторых газов следующие, %: 5-15 - природный; 6-30 - коксовый; 35-75 - доменный; 20-75 - генераторный.

Загазованность воздуха может вызвать отравление людей и взрывы. Наиболее опасным (ядовитым) является газ, содержащий СО (доменный, генераторный, коксовый). Предельно допустимая концентрация его не должна превышать 0,002 мг/л.

Взрывоопасная смесь образуется в результате недостаточного удаления воздуха из печи или газопровода или в результате больших утечек газа, либо в результате присосов воздуха.

## ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

1. Михеев В.П. Газовое топливо и его сжигание. – Л.: Недра, 1966. – 327с.
2. Иванов Ю.В. Основы расчета и проектирования газовых горелок. – М.: Государственное научно – техническое издательство нефтяной и горно – топливной литературы, 1963. – 360с.
3. Лавров Н.В., Розенфельд Э.И., Хаустович Г.П. Процессы горения топлива и защита окружающей среды. – М.: Metallurgia, 1981. – 240с.
4. Казанцев Е.И. Промышленные печи. Справочное руководство для расчетов и проектирования. – М.: Metallurgia, 1975. – 368с.
5. А.с. 1301852 СССР, МКИ С21Д 1/34. Способ отопления промышленных печей/ Н.Ф. Парахин, Н.А. Костырко, С.Ф. Парахина, Н.А. Тольский, В.Н. Жарова (СССР). – №3866570/22-02; Заявлено 25.12.84; Оpubл. 07.04.87, Бюл. №13.
6. А.с. 1710589 СССР, МКИ С21Д 9/70. Способ отопления нагревательных печей/ Н.Ф. Парахин, Н.А. Костырко, С.Ф. Парахина, А.Т. Яковенко, И.Д. Сорочинский, В.Н. Жарова (СССР). – 4699856/02; Заявлено 02.06.89; Оpubл. 07.02.92, Бюл. №5.
7. А.с. 1281825 СССР, МКИ F23Д 14/48, 14/78. Горелка / Н.Ф. Парахин, Е.Ю. Губский (СССР). – №3896572/24-06; Заявлено 20.05.85; Оpubл. 07.01.87, Бюл. №1.
8. А.с. 1574994 СССР, МКИ F23Д 1/04. Горелка / Н.Ф. Парахин, В.Т. Ширяев, И.Н. Кононенко С.Ф. Парахина, (СССР). – 4230627/24-06; Заявлено 15.04.87; Оpubл. 30.06.90, Бюл. №24.
9. Гусовский В.Я. Сожигательные устройства нагревательных и термических печей. – М.: Metallurgia, 1981. – 272с.
10. Иссерлин А.С. Основы сжигания газового топлива. – Л.: Недра, 1980. – 272с.
11. Хзмалян Д.М., Каган Я.Н. Теория горения и топочные устройства. – М.: Энергия, 1976. – 488с.
12. Ахмедов Р.Б. Дутьевые газгорелочные устройства. – М.: Недра, 1977. – 272с.
13. Дитякин Ю.Ф., Клячко Л.А., Новиков Б.В. Распыливание жидкостей. – М.: Машиностроение, 1977. – 208с.

14. Кулагин Л.В., Морошкин М.Я. Форсунки для распыливания тяжелых топлив. – М.: Машиностроение, 1973. – 200с.
15. Шурыгин А.П. Расчет форсунок для распыливания жидкостей. М.: Издательство МЭИ, 1972. – 82с.
16. Бернадинер М.Н., Шурыгин А.П. Огневая переработка промышленных отходов. – М.: Химия, 1990. – 304с.
17. Ковалев А.П., Лелеев Н.С., Виленский Т.В. Парогенераторы. – М.: Энергоатом издат, 1985. – 376с.
18. Парахин Н.Ф., Костырко Н.А., Доронина Л.И. Интенсификация процесса горения газообразного топлива в промышленных печах. Донецкий политехнический институт. – Донецк, 1986 – 9с. – Деп. В УкрНИИНТИ 26.06.86, №1463-УК.
19. Симякевич Б.Г., Голышев Л.В. Сжигание высокозольных углей в энергетических установках. – Киев: Наукова думка. – 1986. – т.8. - №5. – С.84-89.
20. Контарович Б.В. и др. Гидродинамика и теория горения потока топлива / Б.В. Контарович, В.И. Митклинный, Г.Н. Деягин, М.В. Иванов; под. ред. Б.В. Контаровича. – М.: Металлургия, 1971. – 488с.
21. ГОСТ 21204-83 (СТ СЭВ 1051-78). Горелки газовые промышленные. Классификация, общие технические требования, маркировка и хранение = Gas burners, classification, general technical requirements, and storage. – Взамен ГОСТ 21204 – 75; Введ. 01.01.85 до 01.01.90. – М.: Изд-во стандартов, 1986.– 10с.
22. Карабин А.И., Раменецкая Е.С., Энно И.К. Сжигание жидкого топлива в промышленных установках. – М.: Металлургия, 1966. – 372 с.
23. Кулагин Л.В., Морошкин М.Я. Форсунки для распыливания тяжелых топлив. – М.: Машиностроение, 1973. – 200 с.
24. Гилод В.Я. Сжигание мазута в металлургических печах. – М.: Металлургия, 1973. – 312с.
25. Абрамович Г.Н. и др. Теория турбулентных струй / Г.Н. Абрамович, Т.А. Гиршович, Крашениников С.Ю. и др; под ред. Г.Н. Абрамовича. – М.: Наука, 1984. – 716 с.
26. Инжекционные горелки. Каталог – справочник / Стальпроект. – М.: ГОСИНТИ, 1962. 27 с.
27. Ромадин В.П. и др. Рекомендации по выбору, расчету и проектированию пылеугольных горелок для сжигания АШ, ПА и

- тощих углей в открытых и полуоткрытых топках. – М.: Теплоэнергетика. – 1968. - №2. – С 81 - 88
28. Перспективи використання в металургії і теплоенергетиці технології газифікації вугілля в розплаві шлаку/ Кравцов В.В., Шелудченко В.І. // Вісник УБЕНТЗ. - 1998. - №6. - с. 62-66
  29. Технологія виробництва електроенергії з використанням газифікації пилувугільного палива / Кравцов В.В., Шелудченко В.І. // Вісник УБЕНТЗ. - 1999. - №1. - с. 4-6
  30. Технологія виробництва електроенергії з використанням газифікації вугілля в киплячому шарі під тиском / Шелудченко В.І. // Вісник УБЕНТЗ. - 1999. - №1. - с. 7-10
  31. Парахин Н.Ф., Шелудченко В.И., Кравцов В.В. Топливо и теория горения. Уч. пособие. – Севастополь, Вебер, 2003–170с.
  32. Парахин М.Ф., Шелудченко В.І., Кравцов В.В. Топочні процеси та пристрої. Навчальний посібник. – Севастополь, Вебер, 2003. – 181 с.
  33. Парахин М.Ф., Шелудченко В.І., Кравцов В.В. Спеціальні питання спалення та термічної переробки палива: РІА, ДонДТУ, 1999. – 252 с.
  34. Парахин Н.Ф., Шелудченко В.И., Кравцов В.В. Сжигание и термическая переработка топлива. Учебное пособие, Донецк, РИА ДонДТУ, 1999.–268 с.
  35. Семикин И.Д., Аберин С.И., Радченко И.И. Топливо и топливное хозяйство металлургических заводов. – М.: Металлургия, 1965. – 392 с.
  36. Пархоменко Д.М., Покатило Е.П. Методические указания по выполнению курсового проекта по курсу “Специальные вопросы сжигания и термической переработки топлива”. – Донецк: ДПИ, 1981. – 20 с.
  37. Иссерлин А.С. Основы сжигания газового топлива. – Л.:Недра, 1980.–272 с.
  38. Ионин А.А. Газоснабжение. – М.: Стройиздат, 1981. – 415 с.

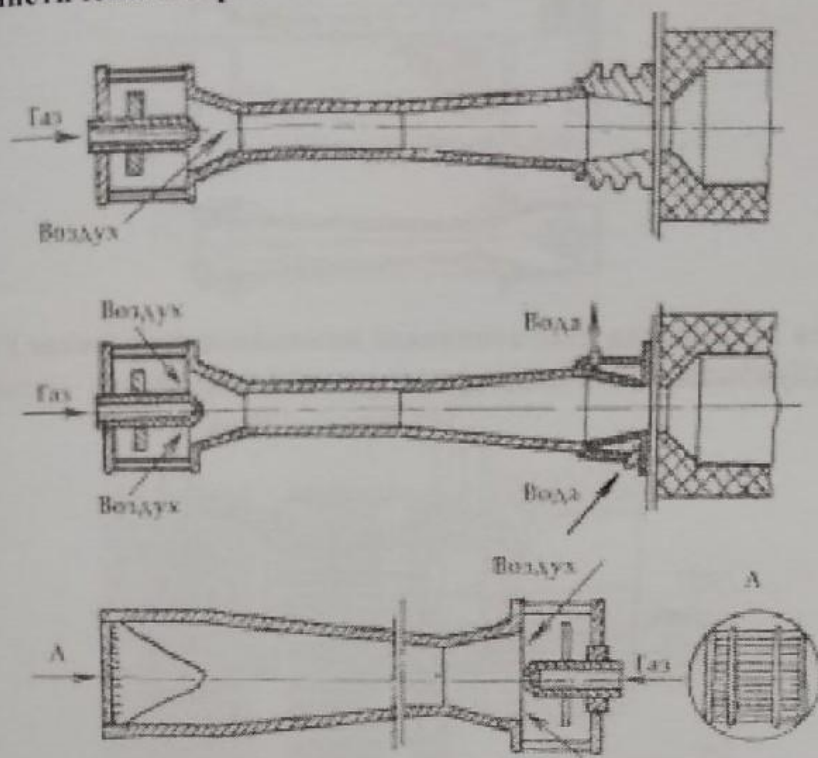
**ПРИЛОЖЕНИЕ В**  
**ЛОГАРИФМЫ КОНСТАНТ РАВНОВЕСИЯ РЕАКЦИЙ,**  
**ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В РАСЧЕТАХ ПРОЦЕССОВ**  
**КОНВЕРСИИ**

T, K	$C+CO_2=$ $=2CO$	$CO+H_2O=$ $=CO_2+H_2$	$CH_4=$ $=C+2H_2$	$CH_4+CO_2=$ $=2CO+2H_2$	$CH_4+H_2O=$ $=CO+3H_2$
	$K_p = \frac{P_{CO}^2}{P_{CO_2}}$	$K_p = \frac{P_{CO_2} \cdot P_{H_2}}{P_{CO} \cdot P_{H_2O}}$	$K_p = \frac{P_{H_2}^2}{P_{CH_4}}$	$K_p = \frac{P_{CO}^2 \cdot P_{H_2}^2}{P_{CH_4} \cdot P_{CO_2}}$	$K_p = \frac{P_{CO} \cdot P_{H_2}^2}{P_{CH_4} \cdot P_{H_2O}}$
	$lg K_p$				
500	-8.792	2.137	-3.428	-12.219	-10.082
600	-5.769	1.451	-2.000	-7.769	-6.318
700	-3.614	0.974	-0.952	-7.566	-3.592
800	-2.004	0.625	-0.167	-2.151	-1.525
900	-0.756	0.361	0.481	-0.265	0.096
1000	0.237	0.156	1.009	1.246	1.401
1100	1.045	-0.007	1.438	2.482	2.475
1200	1.713	-0.138	1.798	3.511	3.373
1300	2.277	-0.247	2.104	4.381	4.134
1400	2.756	-0.338	2.367	5.124	4.785
1500	3.168	-0.415	2.597	5.765	5.350
1600	3.526	-0.480	2.798	6.324	5.844
1700	3.840	-0.536	2.976	6.815	6.279
1800	4.116	-0.584	3.134	7.250	6.666
1900	4.362	-0.626	3.276	7.638	7.012
2000	4.582	-0.663	3.403	7.985	7.322



## ПРИЛОЖЕНИЕ А ПРОМЫШЛЕННЫЕ ГОРЕЛКИ И ФОРСУНКИ

### 1 Кинетические горелки



а – с керамическим туннелем; б – с водоохлаждаемым песком; в – со стабилизатором Казанцева.

Рисунок 1 - Однопроводные инжекционные горелки

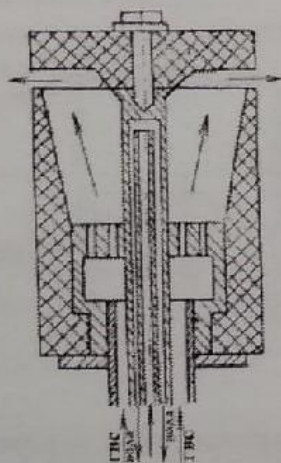


Рисунок 2 – Горелка местного нагрева с кольцевой щелью

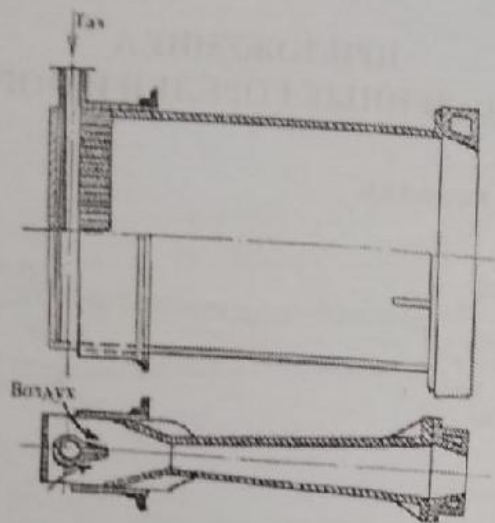


Рисунок 3 – Плоская многосопловая инъекционная горелка КИИ  
(Куйбышевского индустриального института)

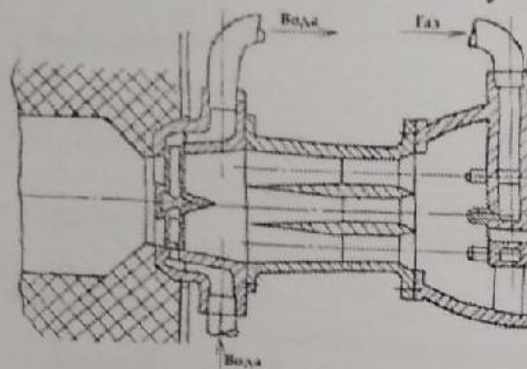


Рисунок 4 – Однопроводная инъекционная горелка с многосопловым смесителем ЗИЛ

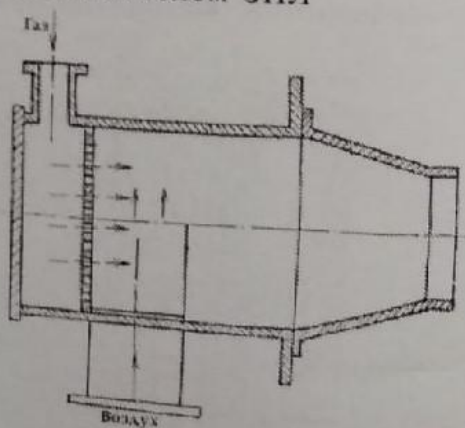


Рисунок 5 – Дутьевая кинетическая горелка с тангенциальным подводом воздуха

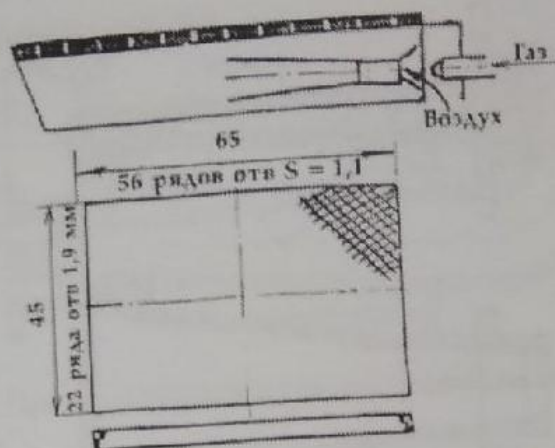
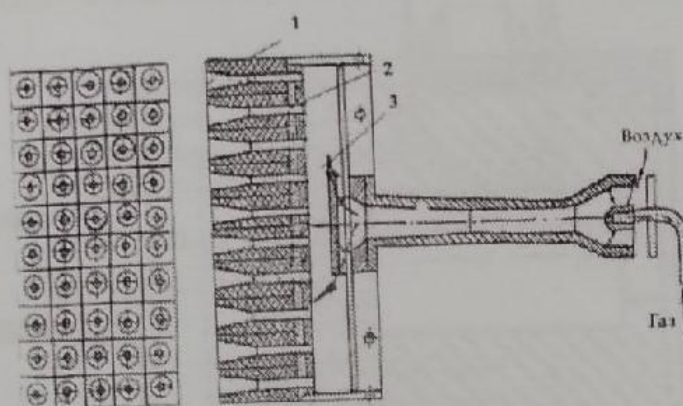


Рисунок 6 – Инфракрасный излучатель



1 – горелочные туннели; 2 – металлические nipples;  
3 – распределительная камера.

Рисунок 7 – Панельная беспламенная горелка Гипронефтмаша

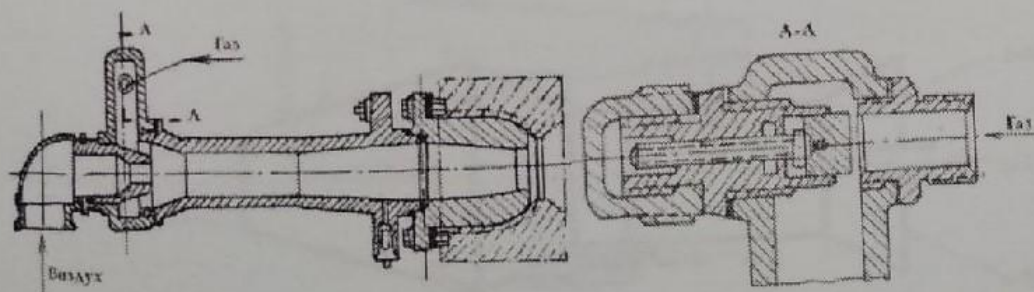
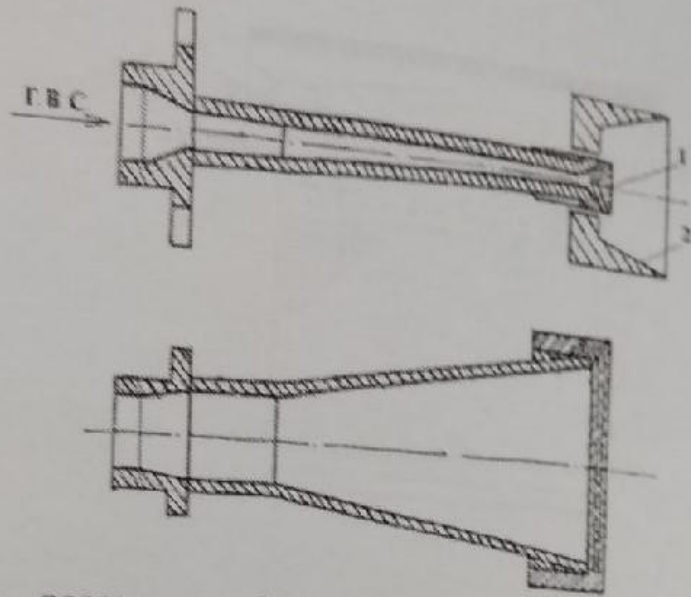


Рисунок 8 – Инжекционная горелка, в которой воздух инжектирует газ (с активной воздушной струей)



1 – рассекатель, 2 - чаша.

Рисунок 9 – Радиационные горелки чашечного типа

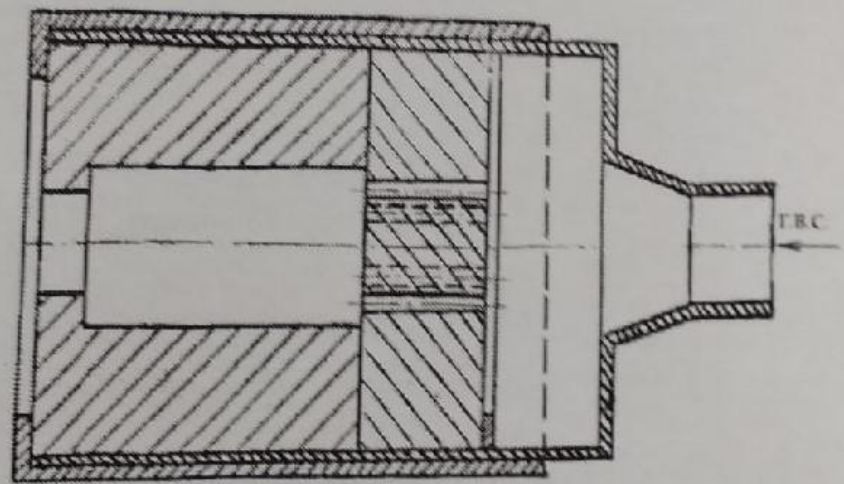


Рисунок 10 – Горелка местного скоростного нагрева для нагрева длинных изделий

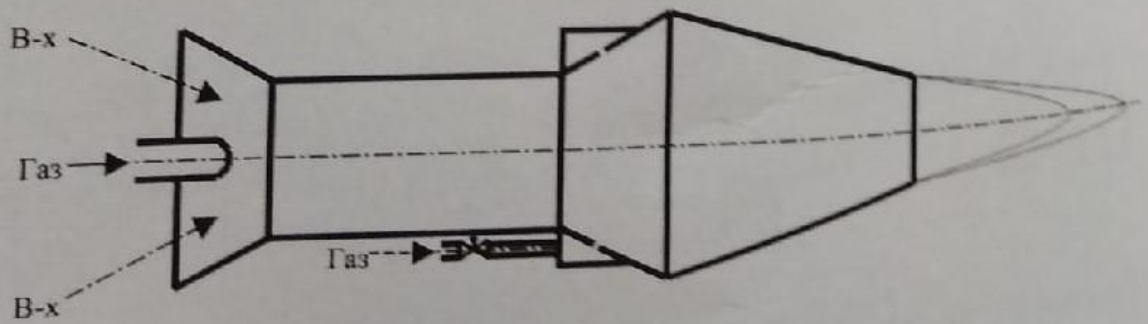


Рисунок 11 – Схема инжекционной горелки

## 2 Диффузионные горелки

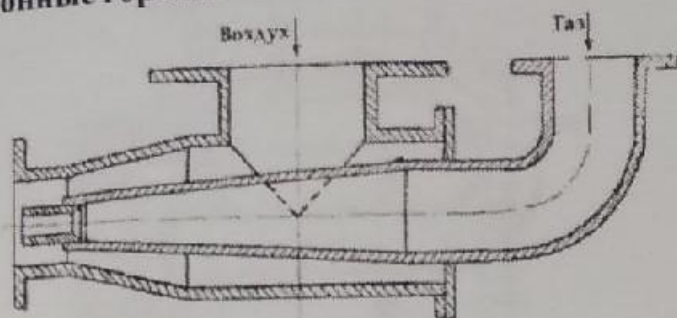


Рисунок 12 – Прямоструйная дутьевая горелка типа “труба в трубе”

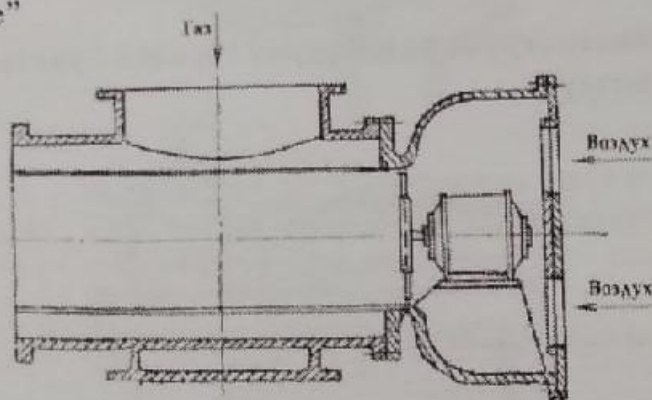
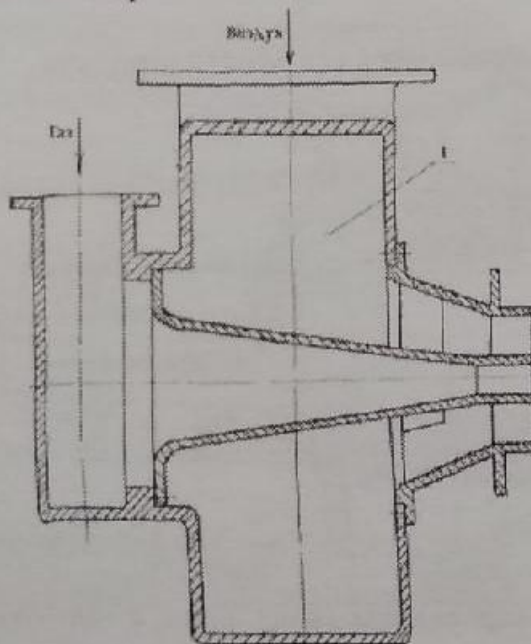


Рисунок 13 – Горелка типа “труба в трубе” с индивидуальным вентилятором



1 – тангенциальный подвод воздуха.

Рисунок 14 – Дутьевая горелка типа “труба в трубе” с закрученным потоком воздуха (вихревая)

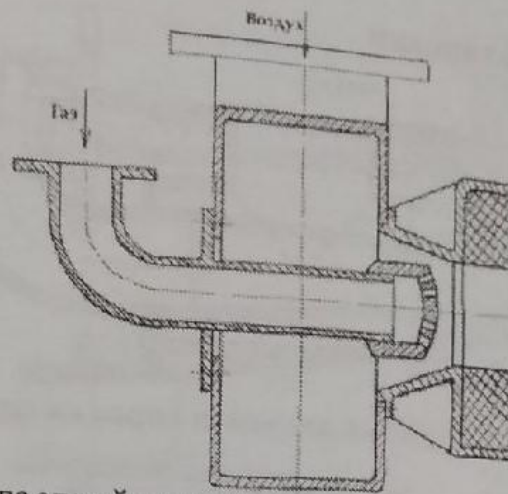


Рисунок 15 – Многоструйная вихревая горелка с улиточным подводом воздуха

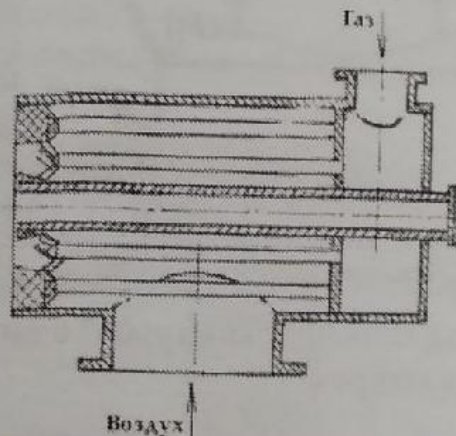
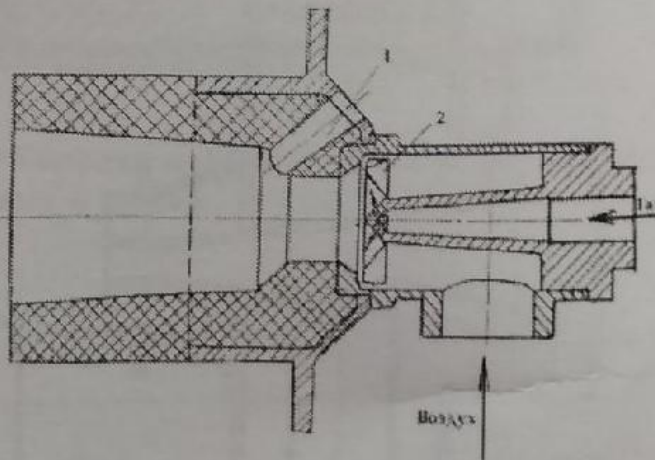
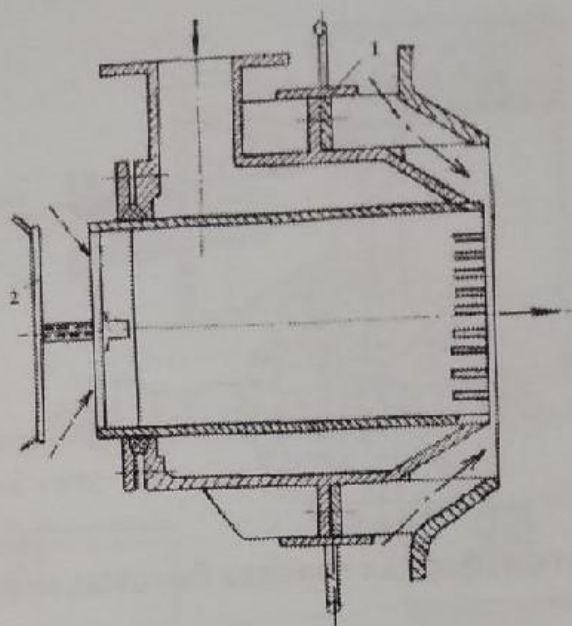


Рисунок 16 – Трубчатая горелка Мосгазпроекта



1 – отверстие для запальника; 2 – лопаточный завихритель.

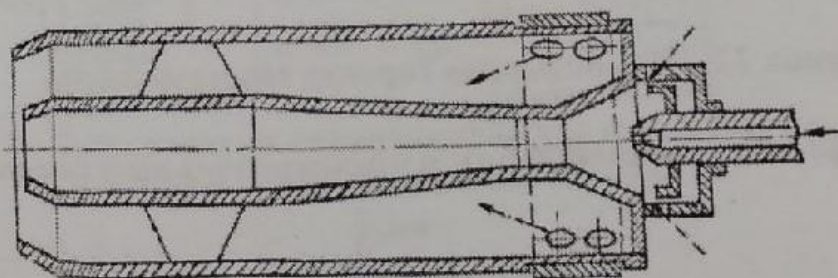
Рисунок 17 – Многоструйная горелка с закруткой воздуха лопаточным завихрителем



1 – кольцо для регулирования вторичного воздуха;  
 2 – диск регулировки первичного воздуха;  
 - - - - - первичный воздух; — · — · — · — вторичный воздух;  
 — — — — — газ.

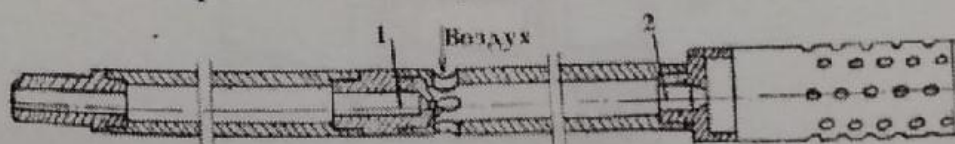
Рисунок 18 – Бездутьевая многоструйная горелка

### 3 Горелки с частичным предварительным смешением



- - - - - первичный воздух; — · — · — · — вторичный воздух;  
 — — — — — газ.

Рисунок 19 – Горелка Мосгазпроекта с единичным факелом



1 – газовое сопло; 2 – сопло, предотвращающее просок  
 пламени в горелку.

Рисунок 20 – Запальная горелка Мосгазпроекта

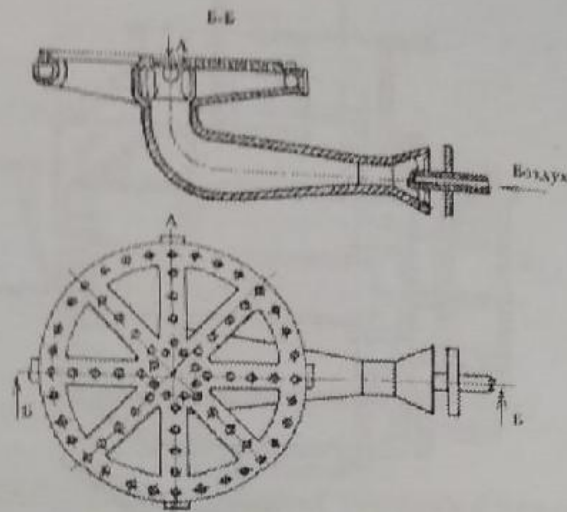
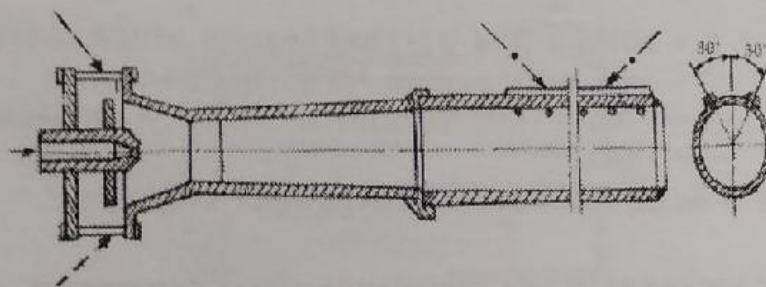


Рисунок 21 – Атмосферная горелка бытовых приборов



--- - первичный воздух; - · - · - вторичный воздух;  
 — - газ.

Рисунок 22 – Атмосферная горелка Мосгазпроекта

#### 4 Горелки с незавершенным предварительным смешением

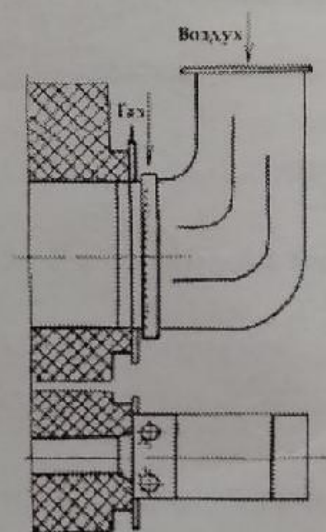


Рисунок 23 – Многоструйная щелевая горелка (однощелевая)



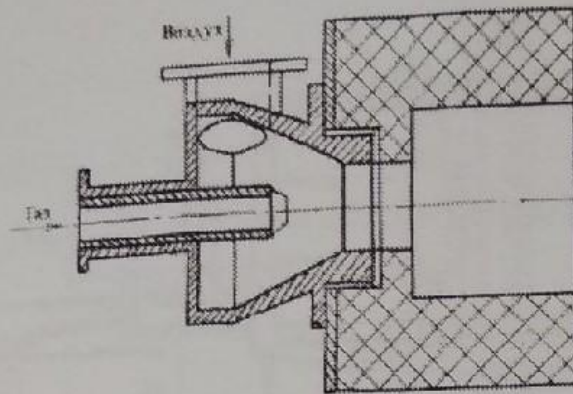


Рисунок 24 – Вихревая горелка с одиночным соплом для подачи газа

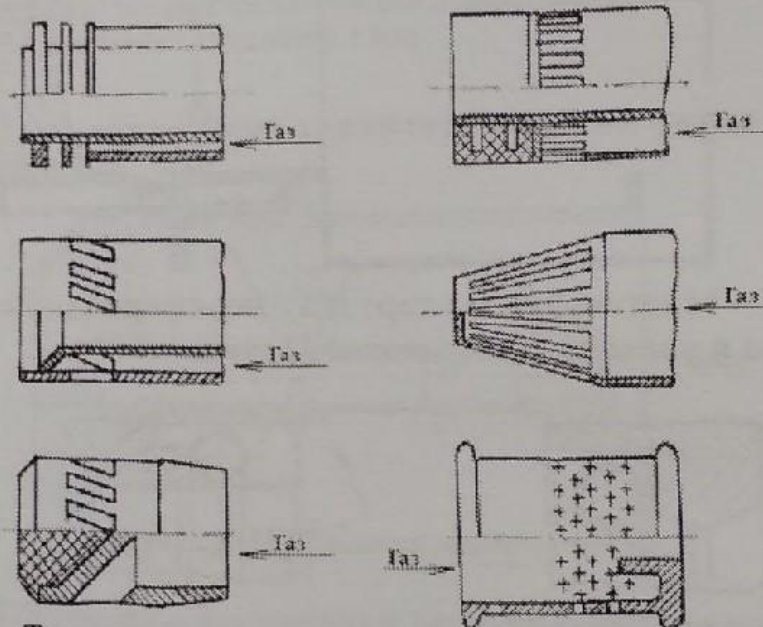
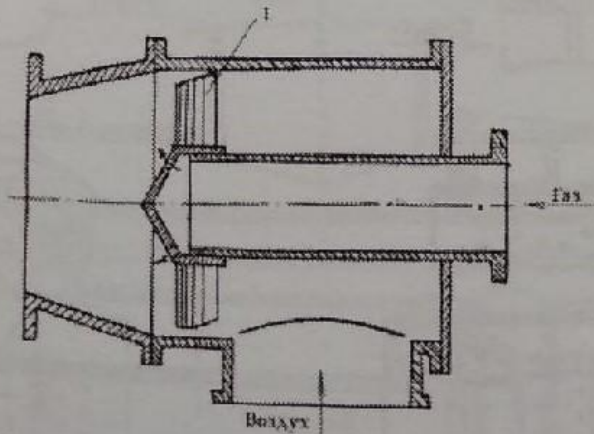


Рисунок 25 – Типы газовых наконечников для многоструйных горелок с центральной подачей газа



1 – лопаточный завихритель.

Рисунок 26 – Многоструйная вихревая горелка Мосгазпроекта с центральной подачей газа

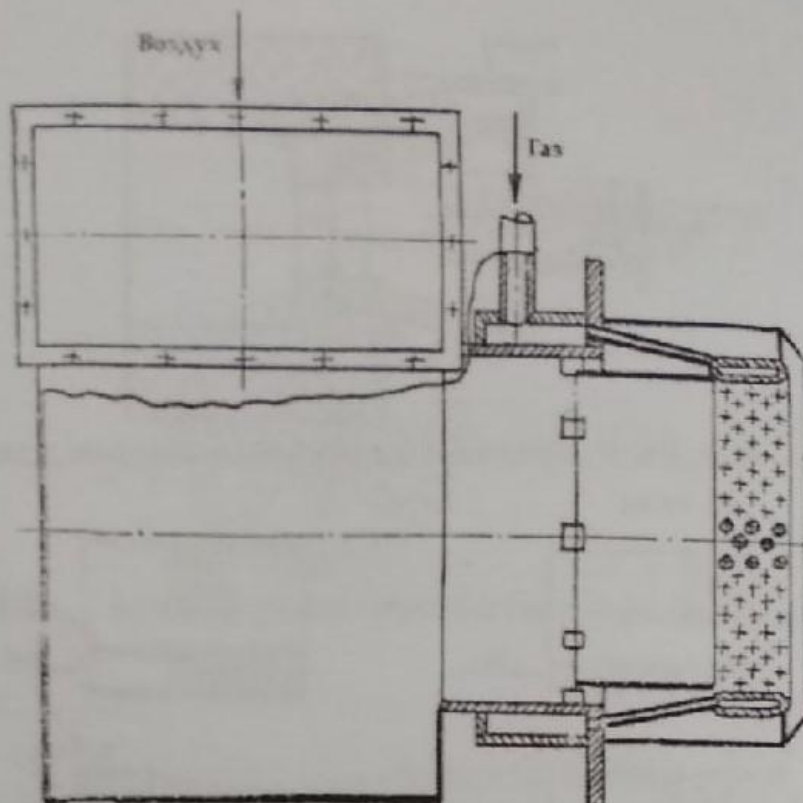


Рисунок 27 – Многоструйная горелка с периферийной подачей газа и улиточным подводом воздуха

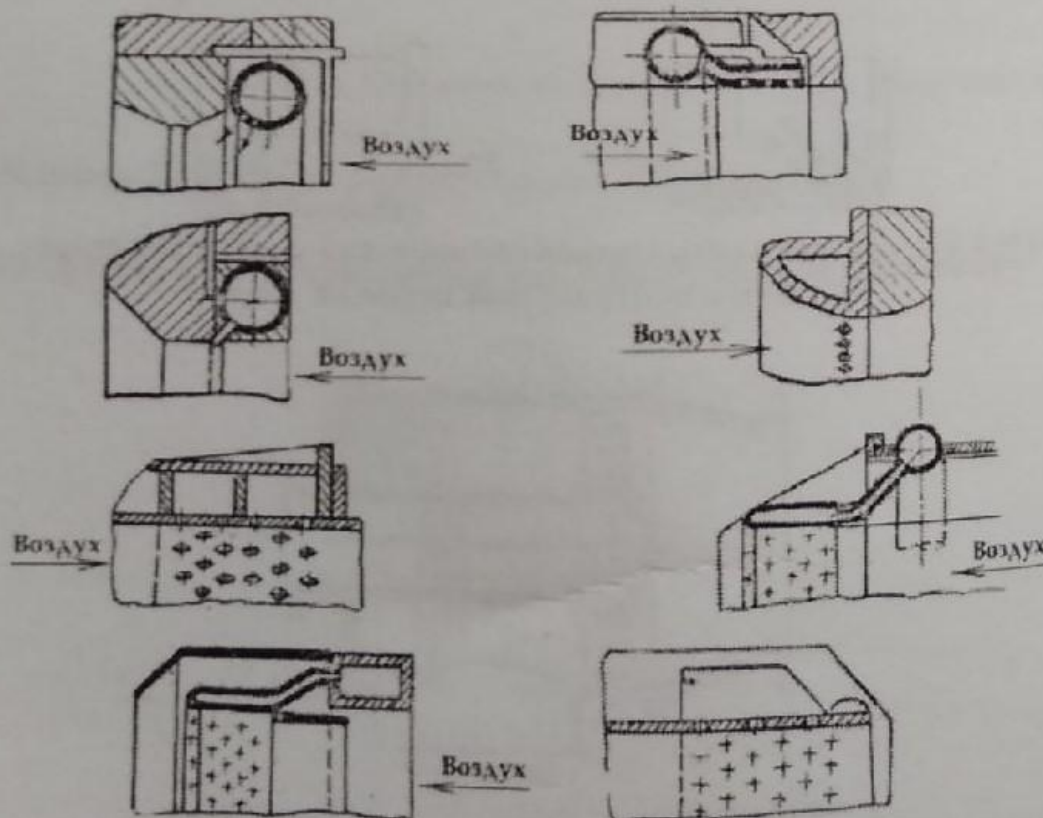


Рисунок 28 – Типы газовых коллекторов многоструйных горелок с периферийной подачей газа

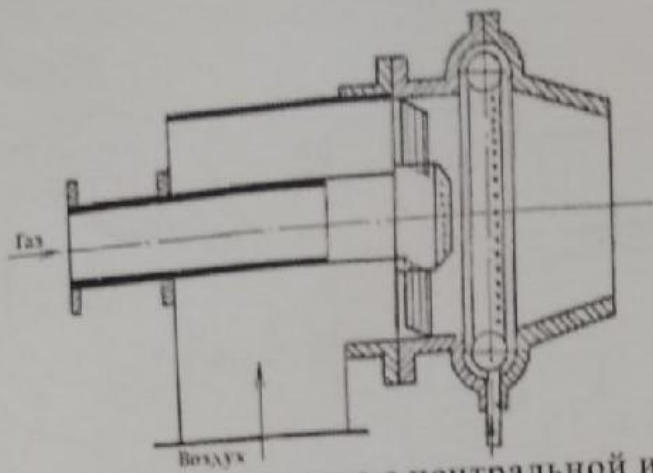


Рисунок 29 – Многоструйная горелка с центральной и периферийной подачей газа

5 Горелки с регулируемыми характеристиками факела

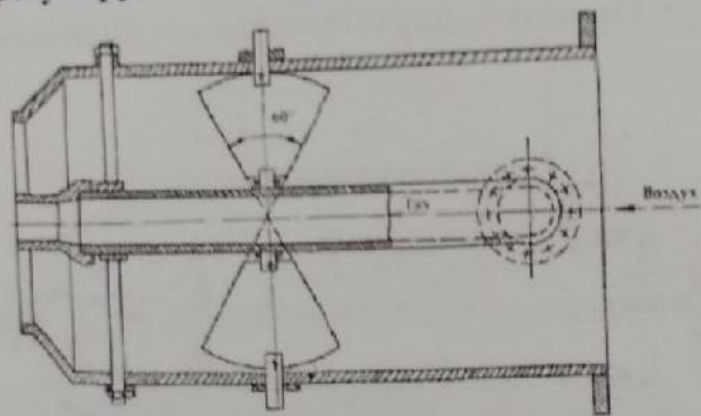
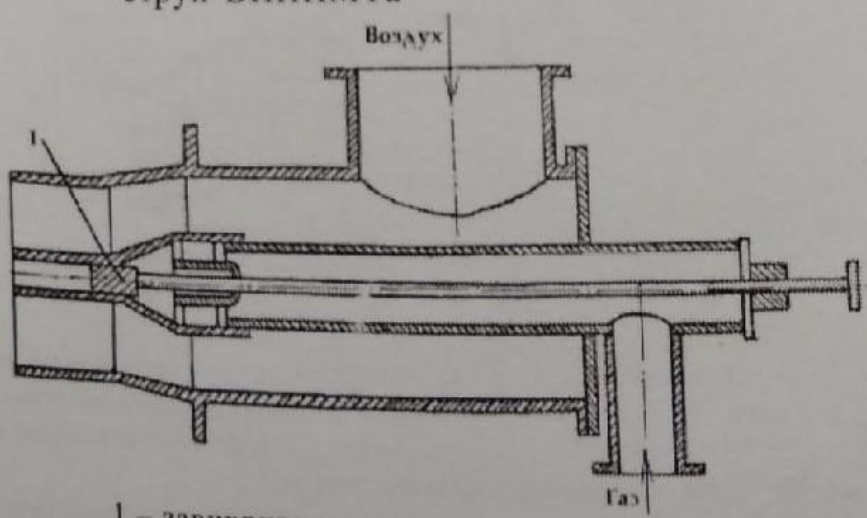
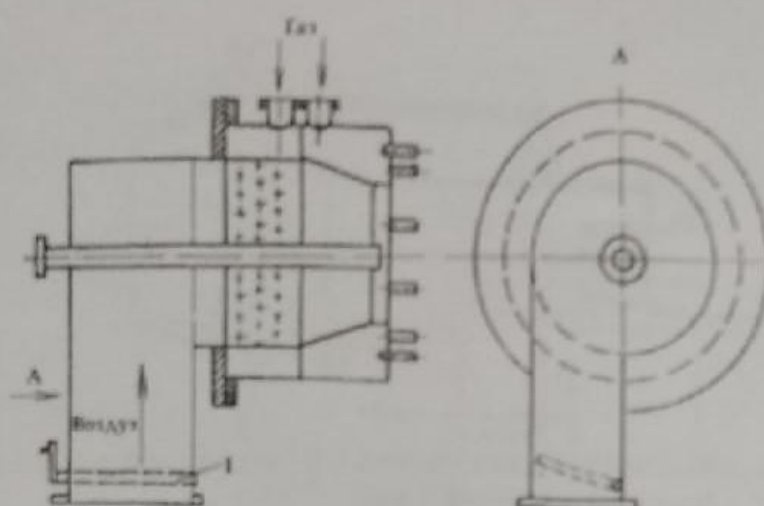


Рисунок 30 – Горелка с изменением закручивания воздушной струи ВНИИМТа



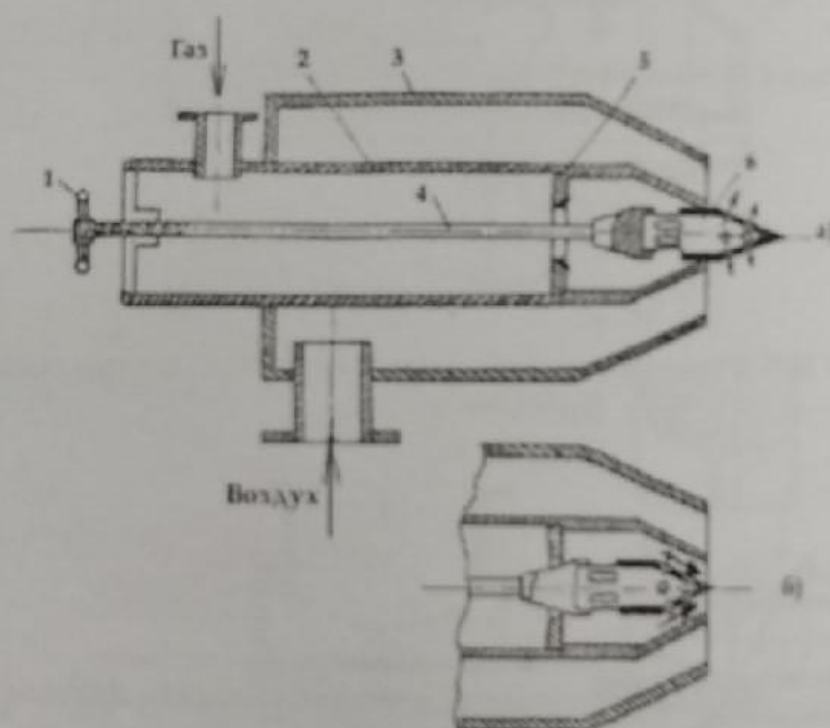
1 – завихритель.

Рисунок 31 – Горелка с изменением закручивания газовой струи



1 – шибер.

Рисунок 32 – Горелка с двухступенчатым подводом газа



1 – маховик; 2 – газовый корпус; 3 – воздушный корпус;  
4 – тяга; 5 – дроссельная шайба; 6 – газораспределитель.

а) положение распределителя в короткофакельном режиме; б) то же в длиннофакельном режиме.

Рисунок 33 – Горелка с регулируемой длиной и светимостью факела

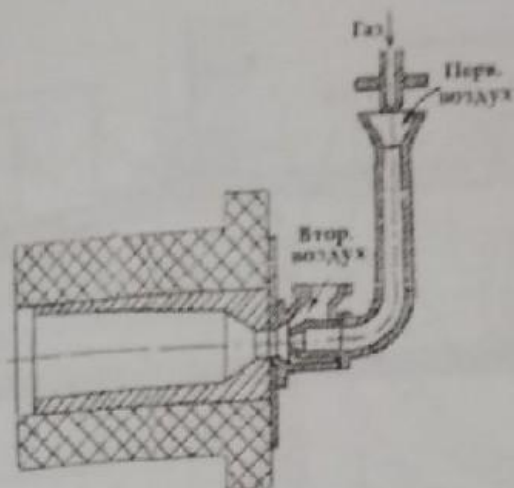
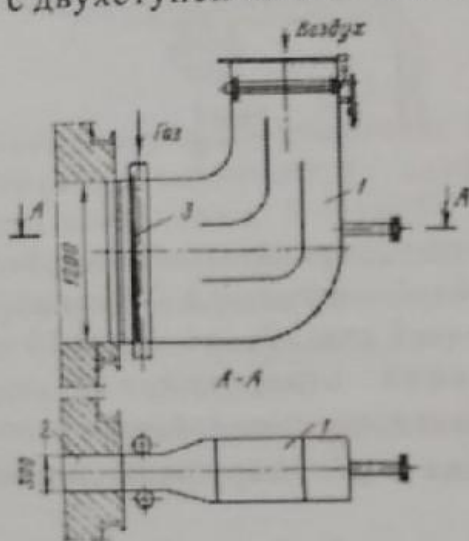
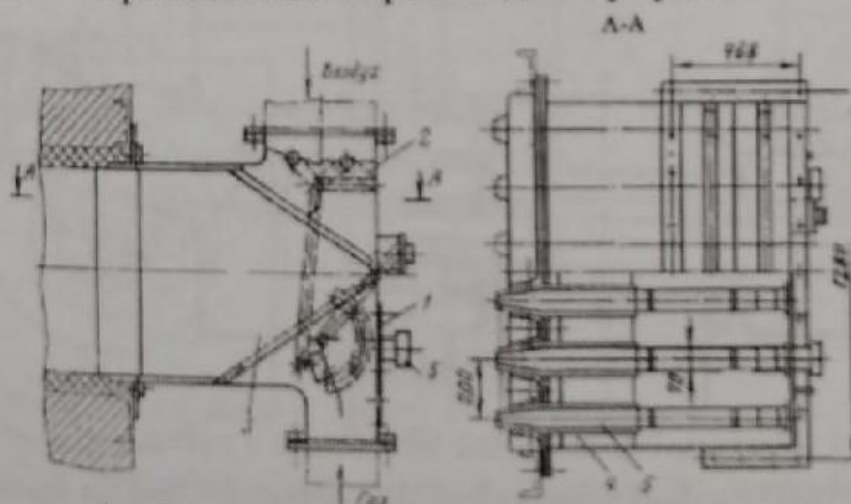


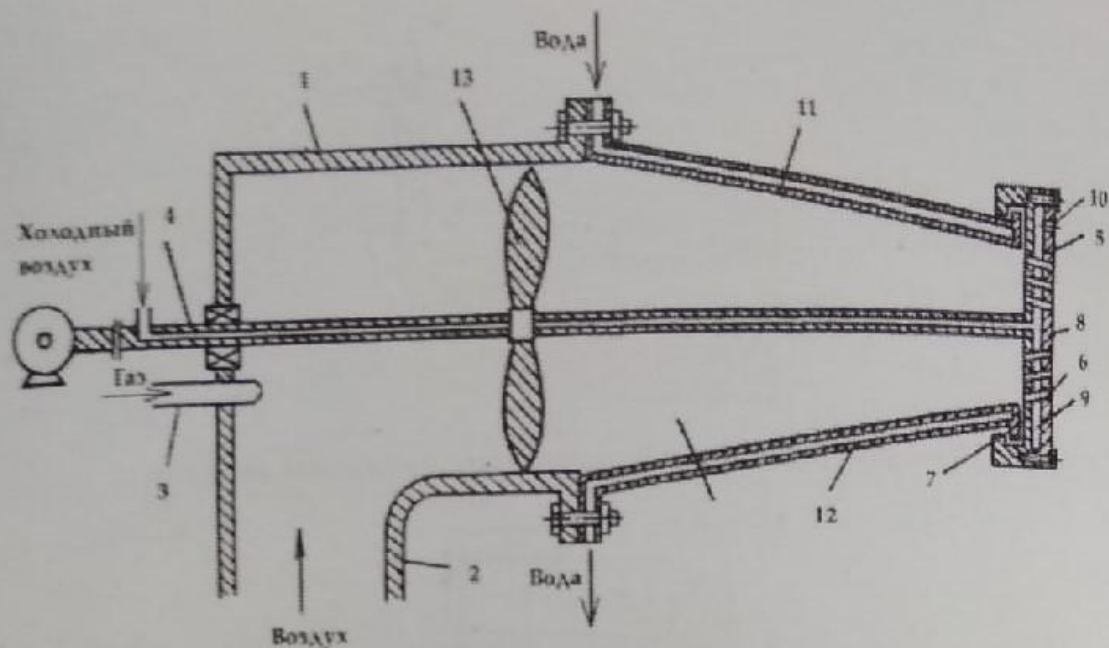
Рисунок 34 – Горелка с двухступенчатым подводом воздуха



1 – короб; 2 – амбразура; 3 – газовые коллекторы  
Рисунок 35 – Прямоточная горелка для природного газа



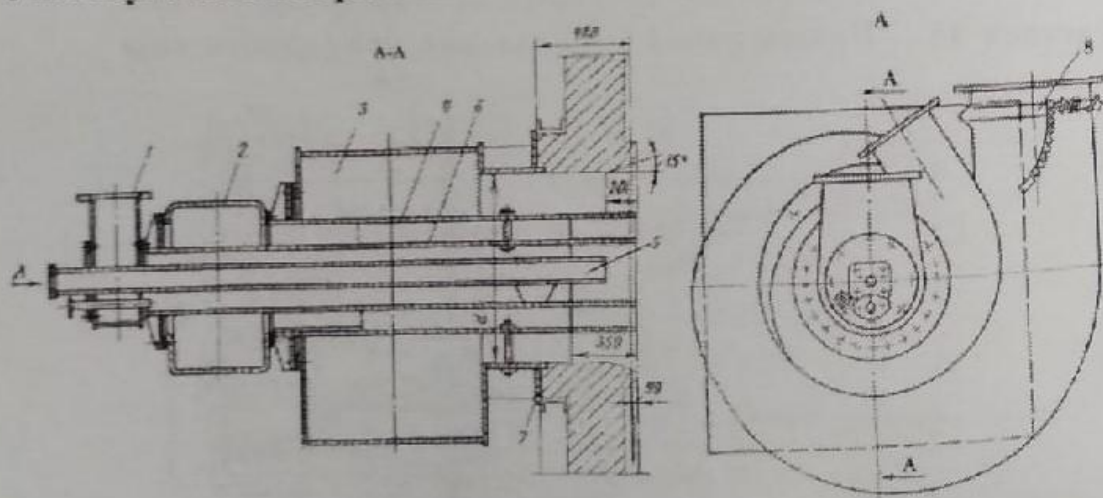
1 – приемный двусторонний коллектор для газа и воздуха; 2 – шибер для регулировки подачи воздуха; 3 – слоистый распределитель; 4 – щели для воздуха; 5 – сопла для газа.  
Рисунок 36 – Горелка ТКЗ для доменного газа



- 1 – корпус; 2 – радиальный патрубок; 3 – топливный патрубок; 4 – труба; 5 – насадка; 6 – каналы; 7 – входной диск; 8 – выходной диск; 9 – полость; 10 – кольцевой ряд аксиальных отверстий; 11 – выходной участок; 12 – водоохлаждаемая рубашка; 13 – лопаточный аппарат.

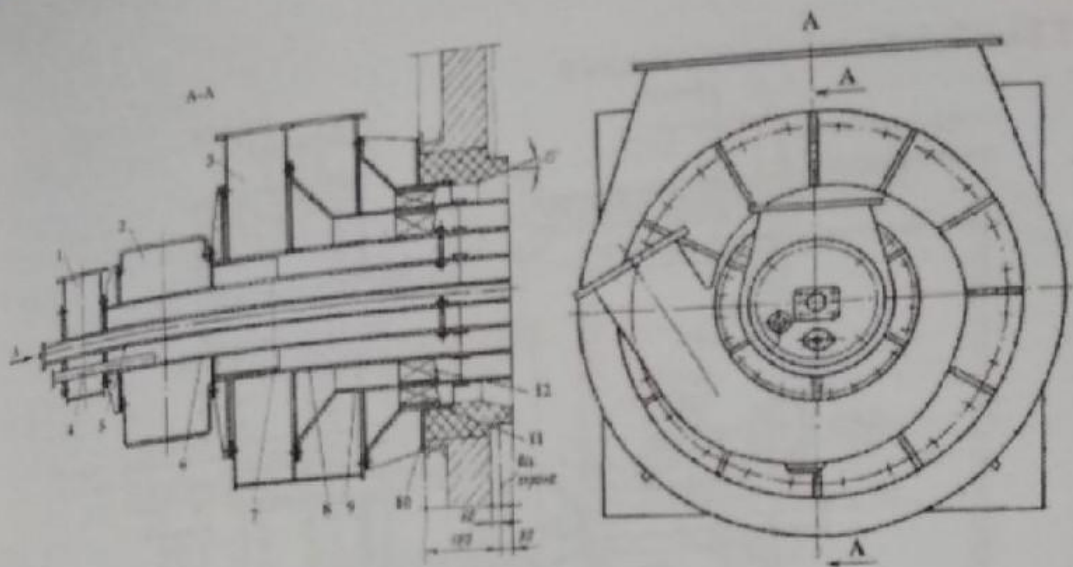
Рисунок 37 - Горелка с регулируемой длиной факела

## 6 Пылеугольные горелки



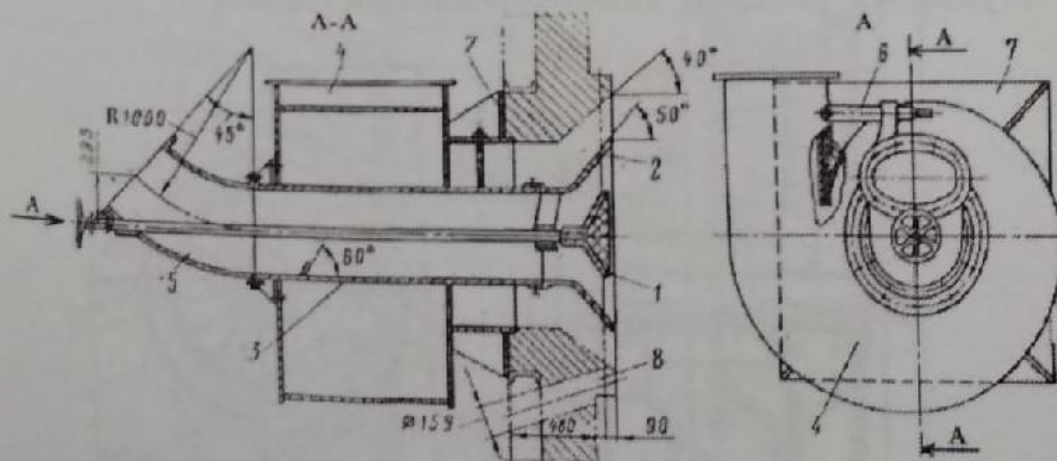
- 1 – короб воздуха для форсунки; 2 – улитка пылевоздушной смеси; 3 – улитка вторичного воздуха; 4 – труба пылевоздушной смеси; 5 – труба мазутной форсунки; 6 – труба внутренняя; 7 – фланец несущий; 8 – шибер с механизмом поворота.

Рисунок 38 – Пылеугольная вихревая двухулиточная горелка



- 1 – короб воздуха для форсунки; 2 – улитка аэросмеси;  
 3 – короб двухпоточный; 4 – труба установки электрогазового запальника; 5 – труба мазутной форсунки;  
 6 – труба внутренняя; 7 – обечайка предохранительная;  
 8 – труба пылевоздушной смеси; 9 – труба разделительная;  
 10 – фланец несущий; 11 – регистр наружный;  
 12 – регистр внутренний.

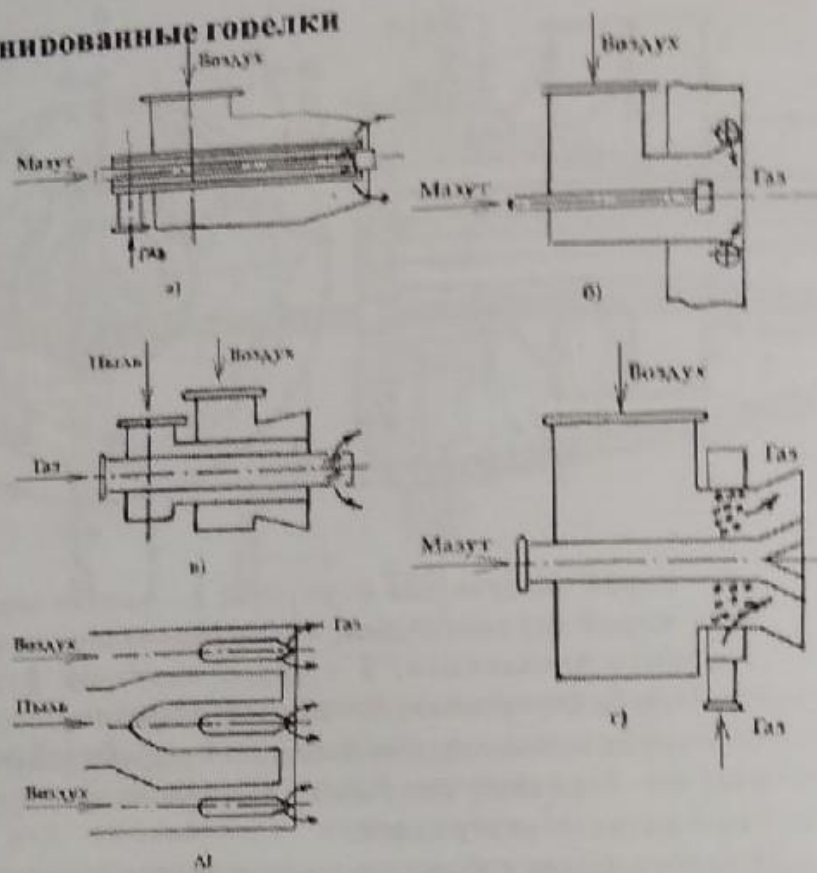
Рисунок 39 – Пылеугольная вихревая улиточно-лопаточная двухпоточная горелка



- 1 – конус с приводной штангой; 2 – раструб; 3 – труба пылевоздушной смеси; 4 – улитка; 5 – патрубкок; 6 – шибер с механизмом поворота; 7 – фланец несущий; 8 – отверстие для установки запальника, фотодатчика и расточной форсунки.

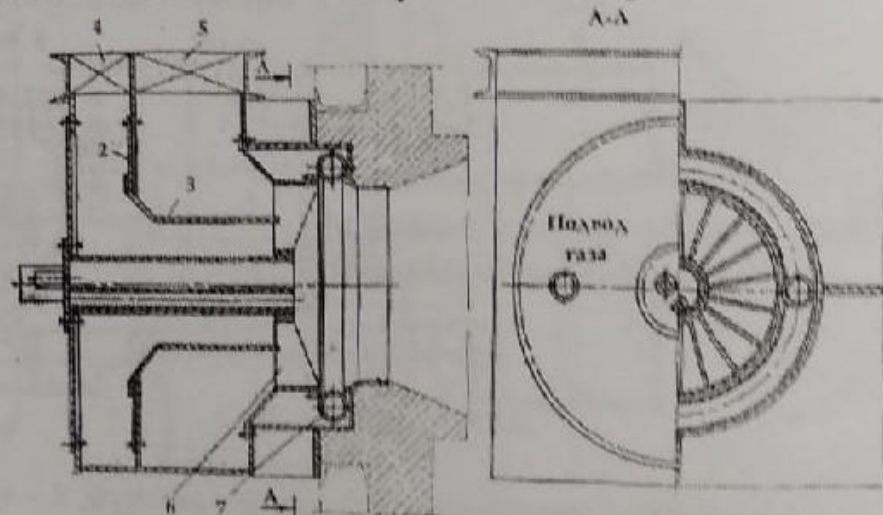
Рисунок 40 – Прямоточно-улиточная горелка

7 Комбинированные горелки



а, б – газомазутные горелки; в, г, д – пылегазовые горелки.

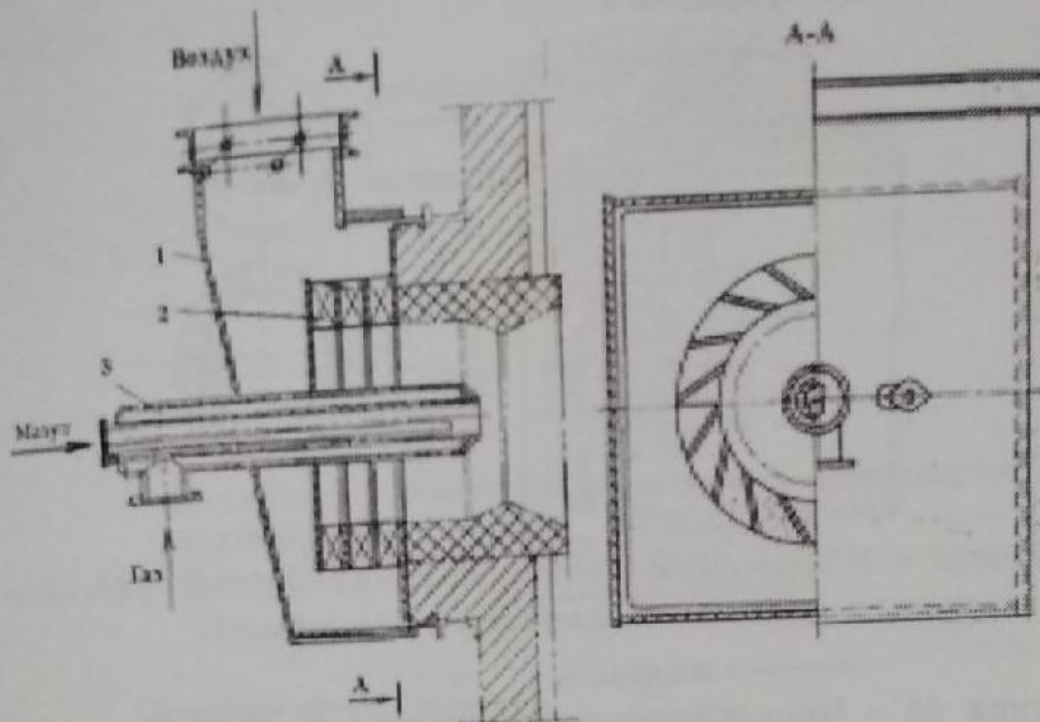
Рисунок 41 – Схемы комбинированных горелок



1 – воздушный короб; 2 – разделительная перегородка; 3 – коаксиальный патрубок; 4 и 5 – шиберы; 6 – цилиндрический регистр осевого типа; 7 – газовый кольцевой коллектор.

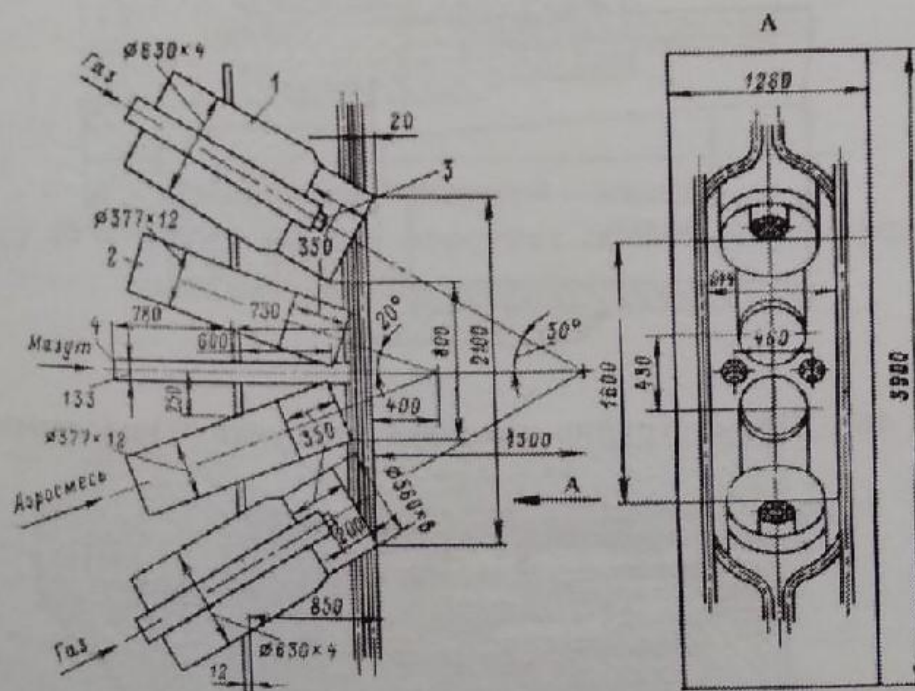
Рисунок 42 – Газомазутная горелка ЦКТИ





1 – короб; 2 – тангенциальный регистр; 3 – кольцевой канал для подачи газа.

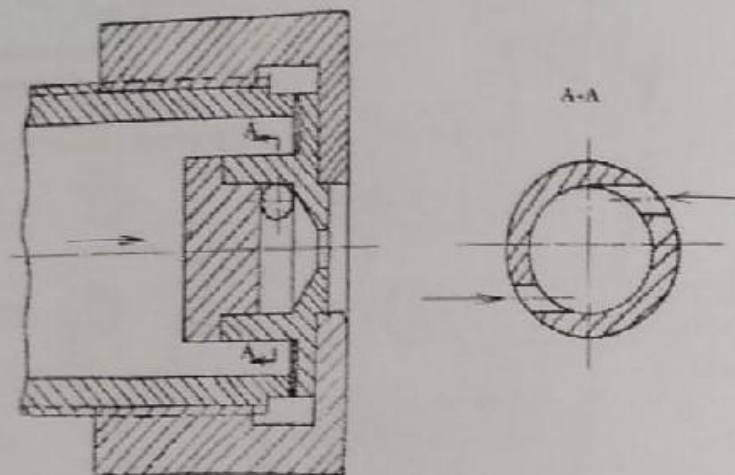
Рисунок 43 – Газомазутная горелка ТКЗ



1 – трубы вторичного воздуха; 2 – трубы для подачи первичного воздуха с угольной пылью; 3 – газовые наконечники; 4 – плоскофакельная паромеханическая форсунка.

Рисунок 44 – Плоскофакельная горелка ЦКТИ и Ворошиловградской ГРЭС

## 8 Механические форсунки



— - жидкость.

Рисунок 45 – Простейшая центробежная форсунка с круглыми тангенциальными входными каналами

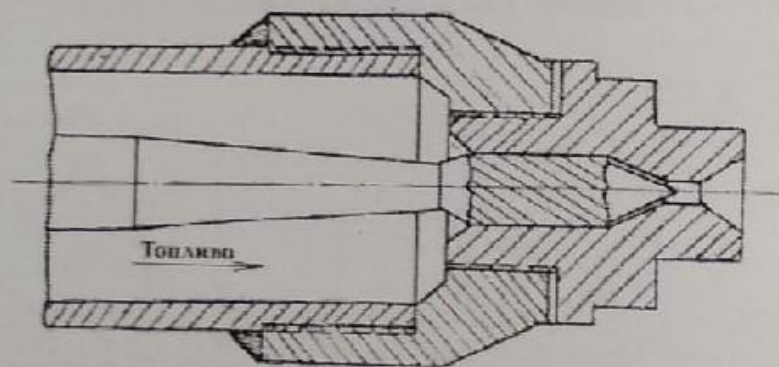
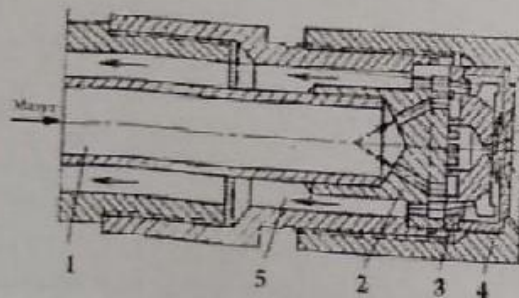
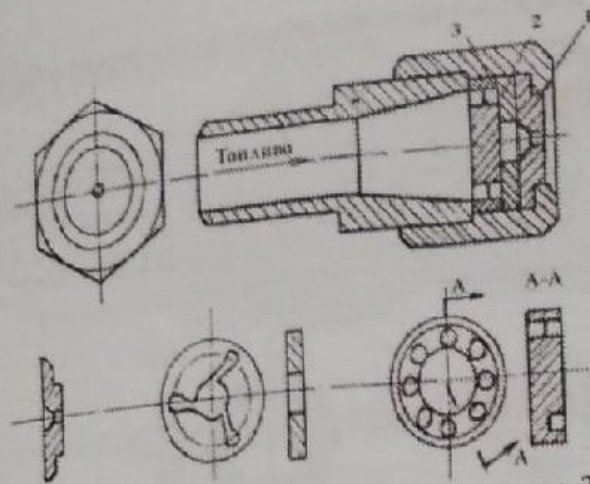


Рисунок 46 – Прямоструйно-вихревая форсунка "Гипроцемента"

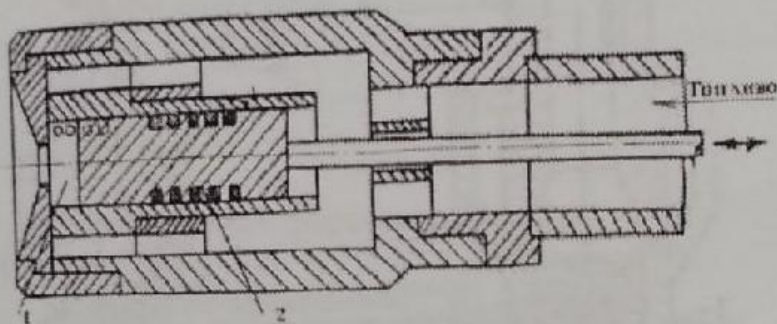


1 – центральный ствол; 2 – распределительная шайба;  
3 – распыливающая шайба; 4 – наконечник; 5 – кольцевой канал для рециркуляции мазута.  
Рисунок 47 – Механическая форсунка с рециркуляцией



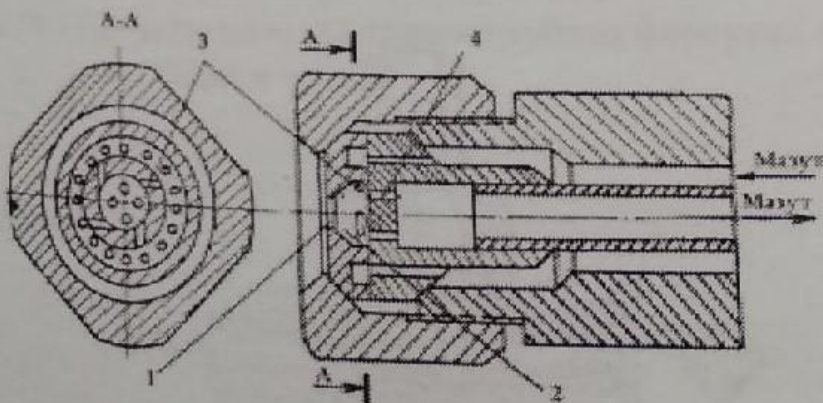
1 – сопло; 2 – камера закручивания; 3 – распределительный диск.

Рисунок 48 – Центробежная форсунка ВТИ, ЦКТИ и завода “Ильмарине” с распределительным диском



1 – камера закручивания; 2 – поршень.

Рисунок 49 – Центробежная форсунка БПК с регулируемым сечением входных каналов



1 – сопло; 2 – камера закручивания; 3 – тангенциальный ввод топлива; 4 – отверстие для отвода избыточного топлива.

Рисунок 50 – Центробежная форсунка с отливом топлива

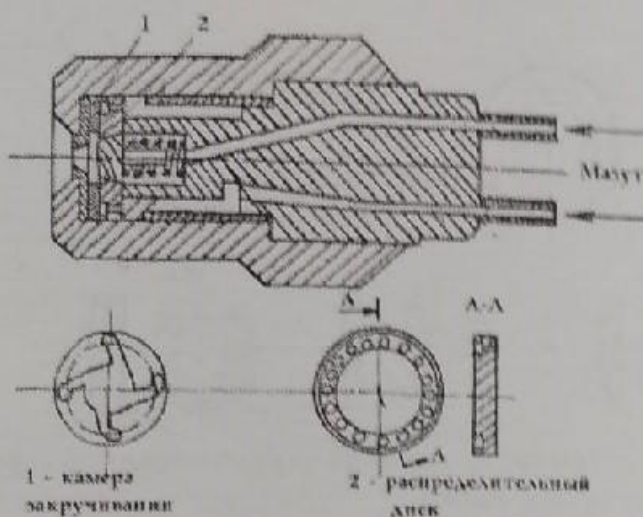
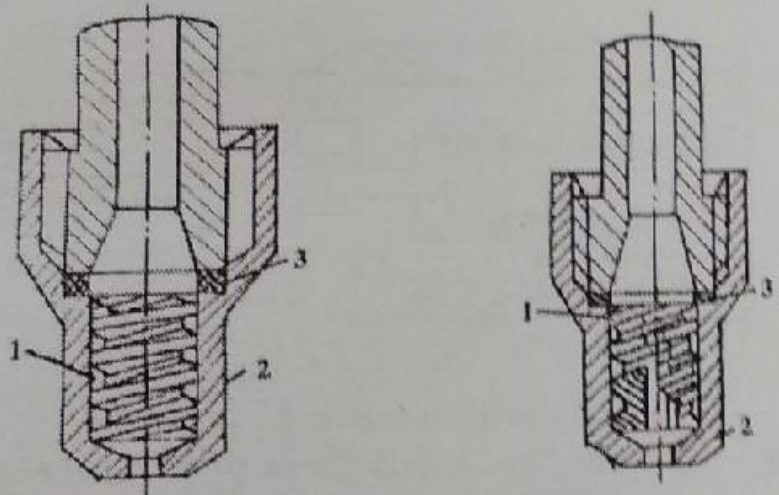
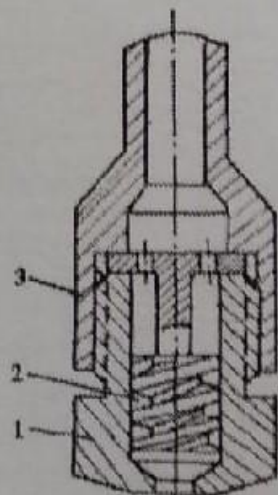


Рисунок 51 – Двухконтурная (двухступенчатая) центробежная форсунка



1 – шнек; 2 – корпус; 3 – прокладка.

Рисунок 52 – Схема форсунок с запрессованным шнеком



1 – корпус; 2 – шнек с распределительной шайбой; 3 – гайка.

Рисунок 53 – Схема форсунки со съёмным шнеком

## 9 Пневматические форсунки высокого давления

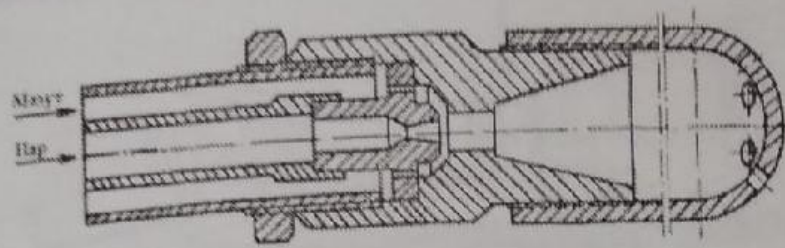


Рисунок 54 – Прямоструйная форсунка ЦКТИ, ВТИ, и з-да "Ильмарине"

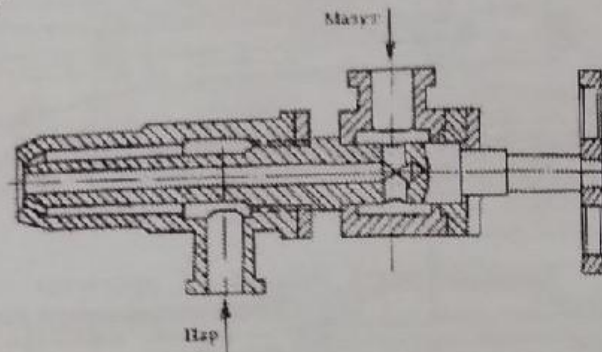


Рисунок 55 – Прямоструйная форсунка Шухова

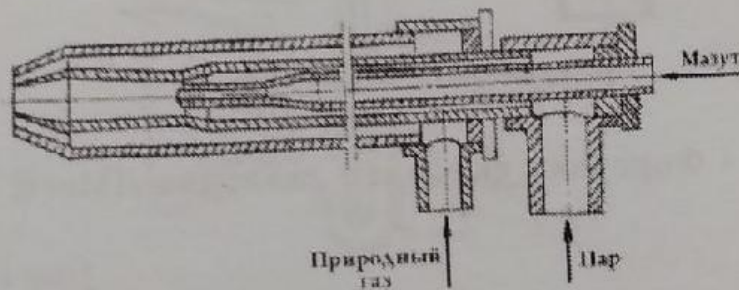


Рисунок 56 – Двухступенчатая прямоструйная форсунка завода "Серп и молот"

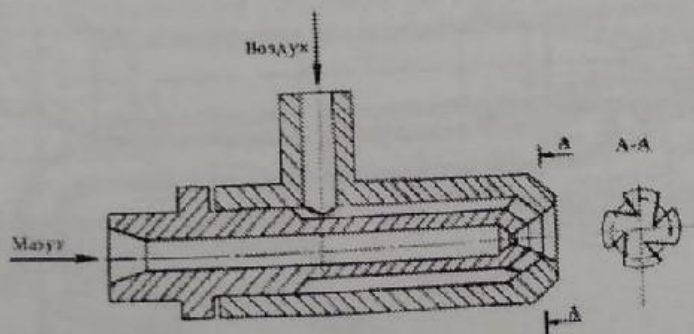


Рисунок 57 – Вихревая форсунка А.И. Карбина (короткофакельная)

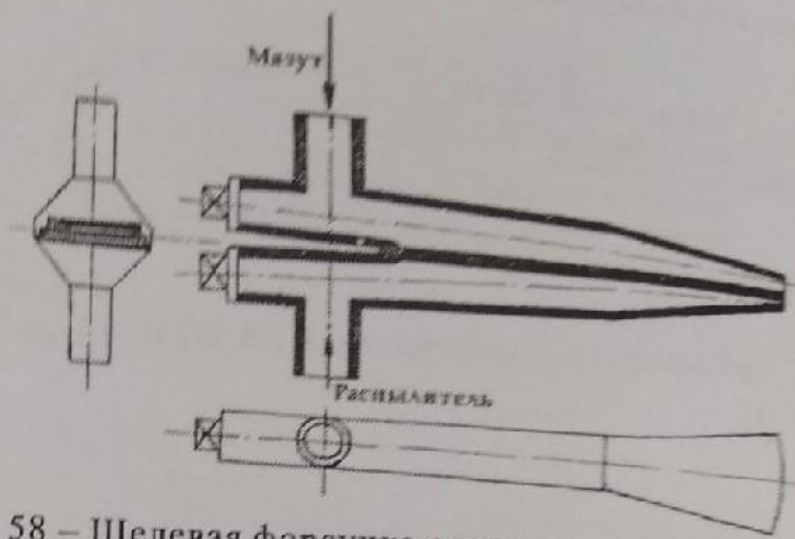


Рисунок 58 – Щелевая форсунка с коротким плоским факелом

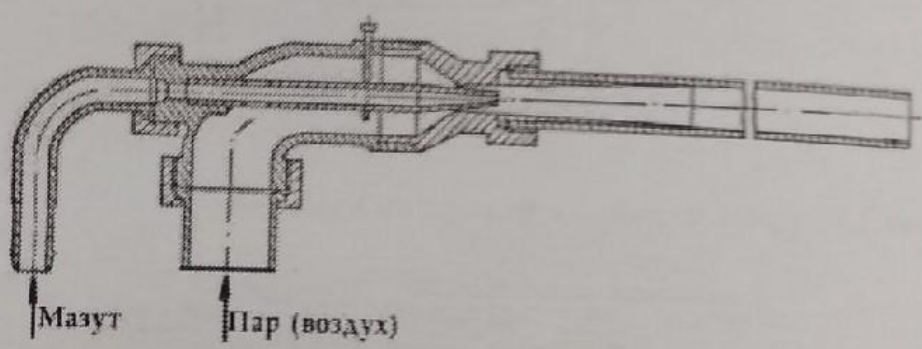


Рисунок 59 - Форсунка высокого давления ДМетИ

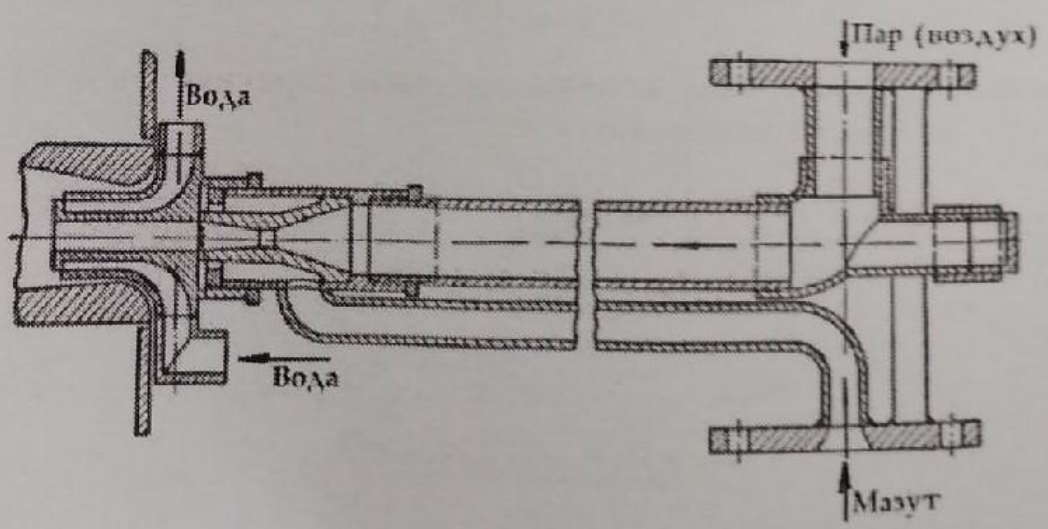
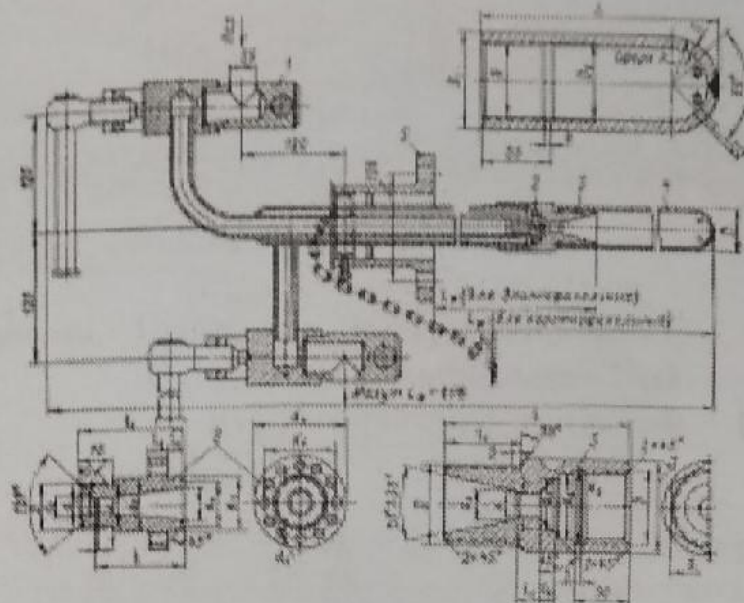


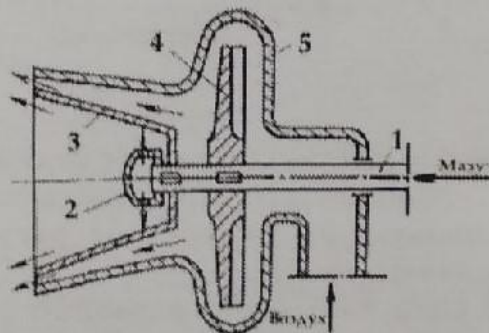
Рисунок 60 - Форсунка высокого давления УПИ

### 10 Пневматические форсунки низкого давления (вентиляторные)



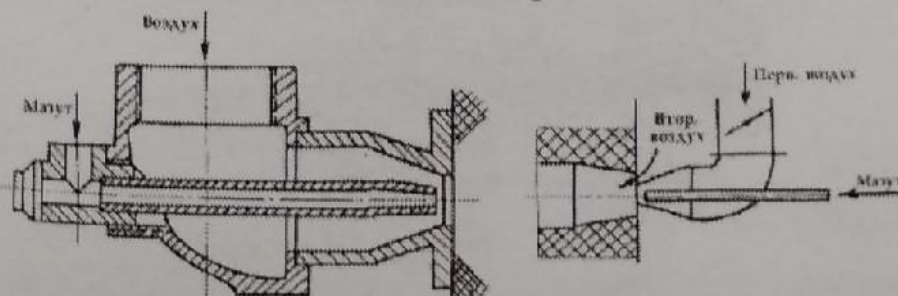
1 – штуцер; 2 – сопло; 3 – диффузор; 4 – насадка;  
5 – фланец.

Рисунок 61 – Мазутная форсунка парового распыливания



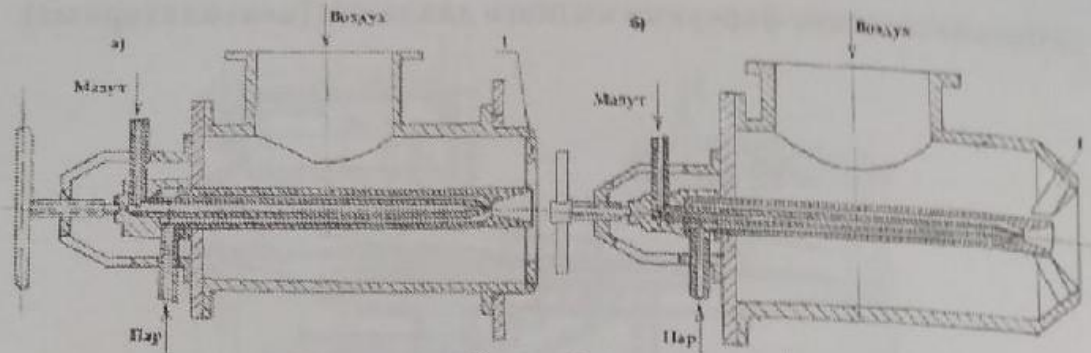
1 – полый вал; 2 – распределитель; 3 – распыливающая  
чаша; 4 – воздушный компрессор; 5 – корпус.

Рисунок 62 – Распыливающая головка ротационной форсунки



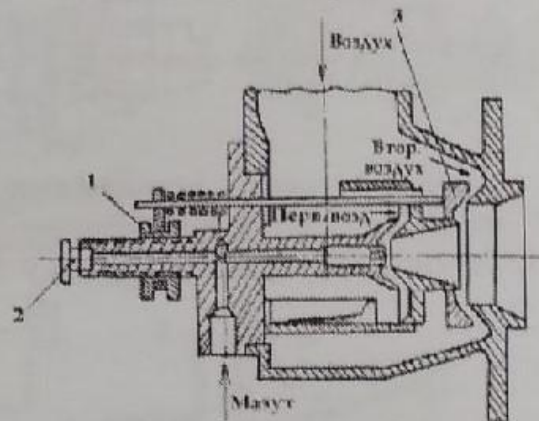
а - Раквелла; б - Грум-Гржимайло.

Рисунок 63 – Нерегулируемые прямоструйные форсунки низкого давления



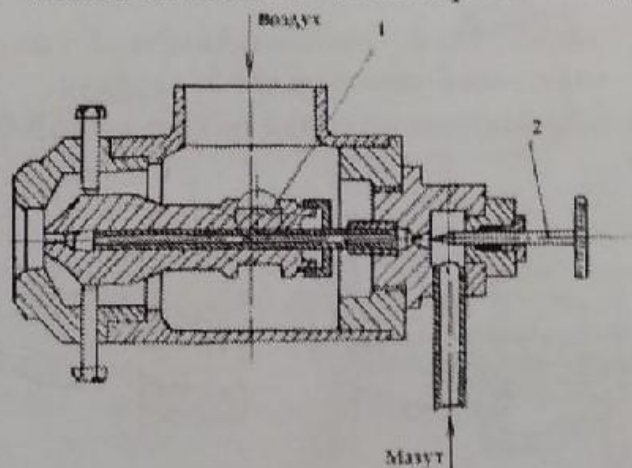
а - прямоструйная; б - вихревая; 1 - подпиральная шайба; 2 - завихритель.

Рисунок 64 – Форсунки Оргэнергонефти



1 – муфта для регулирования подачи вторичного воздуха; 2 – пробка для прочистки топливной трубки; 3 – подвижное кольцо для регулирования расхода вторичного воздуха.

Рисунок 65 – Форсунка внутреннего двойного распыла с встречными потоками Теплопроекта ФДБ



1 – эксцентрик для перемещения мазутного сопла; 2 – игла для регулирования расхода топлива.

Рисунок 66 – Форсунка Стальпроекта с регулируемым проходным сечением для воздуха



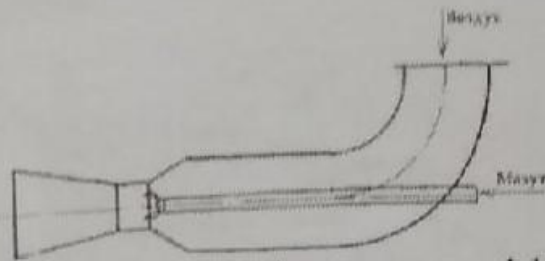


Рисунок 67 – Схема вентиляторной форсунки, диффузорного типа с многоструйной подачей топлива

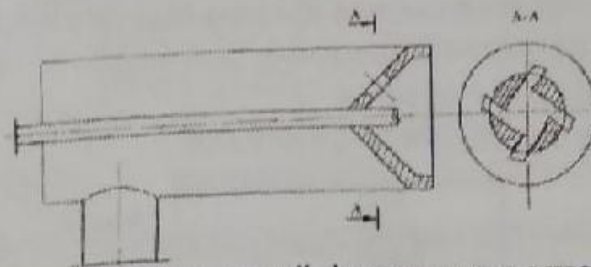
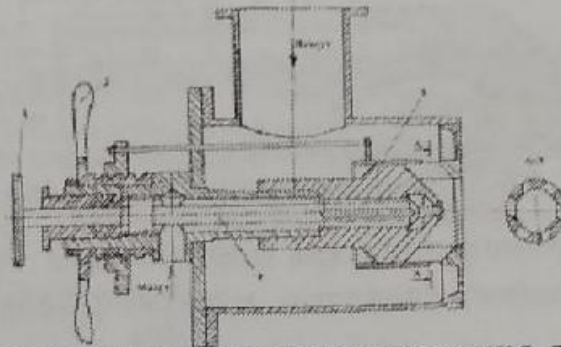


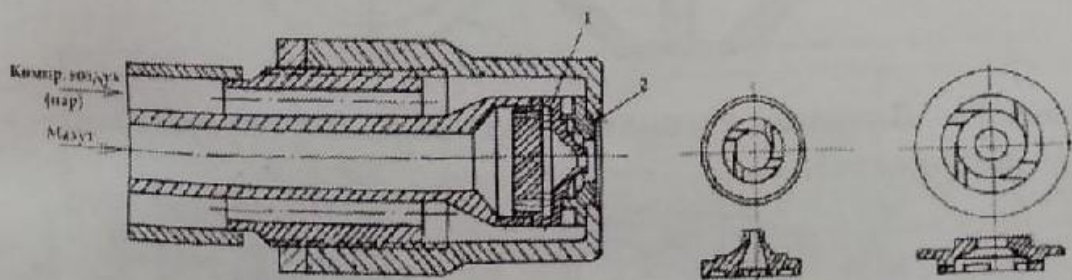
Рисунок 68 – Схема вентиляторной форсунки с многоструйной центральной подачей топлива и аксиально-тангенциальным завихрителем



- 1 – маховичок для регулирования расхода топлива;
- 2 – рукоятка для регулирования расхода воздуха;
- 3 – дроссель; 4 – игла.

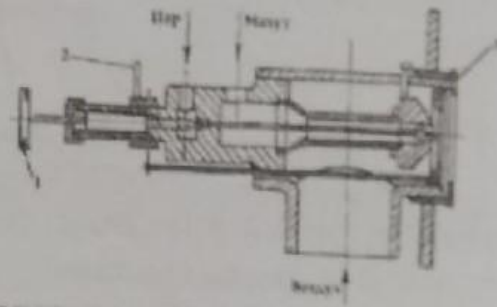
Рисунок 69 – Вихревая форсунка Карабина с регулируемыми проходными сечениями для топлива и воздуха

### 11 Комбинированные форсунки



- 1 – распылитель топлива 2 – завихритель пара (в-ха).

Рисунок 70 – Пневмомеханическая (паромеханическая) форсунка ЦКТИ



1 – маховичок для регулирования расхода пара; 2 – рукоятка для регулирования расхода воздуха; 3 – кольцо для регулирования расхода воздуха.

Рисунок 71 – Паровоздушная форсунка

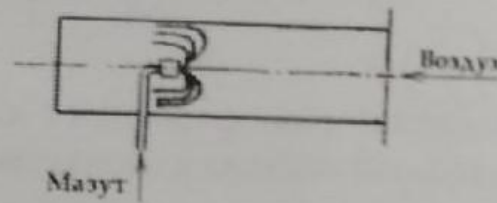


Рисунок 72 – Воздушно-механическая форсунка

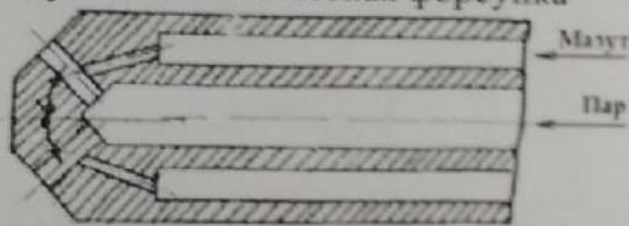


Рисунок 73 – Паромеханическая форсунка с U – образными распыливающими каналами, многосопловая

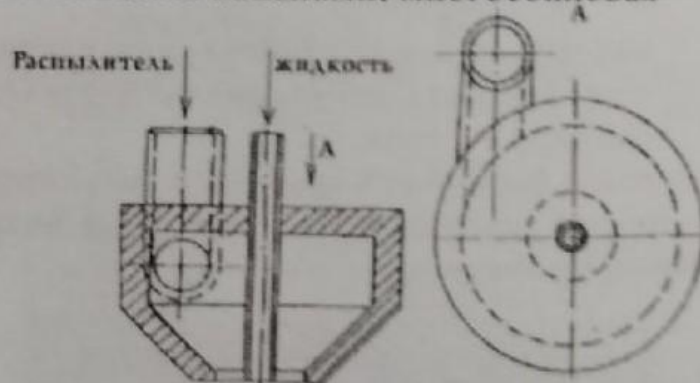


Рисунок 74 – Вихревая пневматическая (паровая) форсунка высокого давления

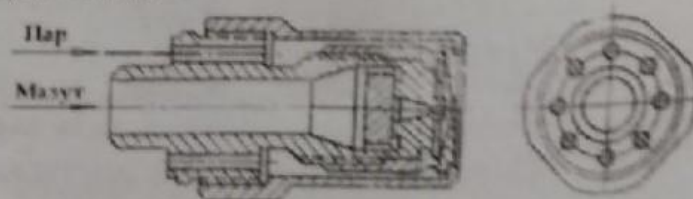


Рисунок 75 – Паромеханическая форсунка

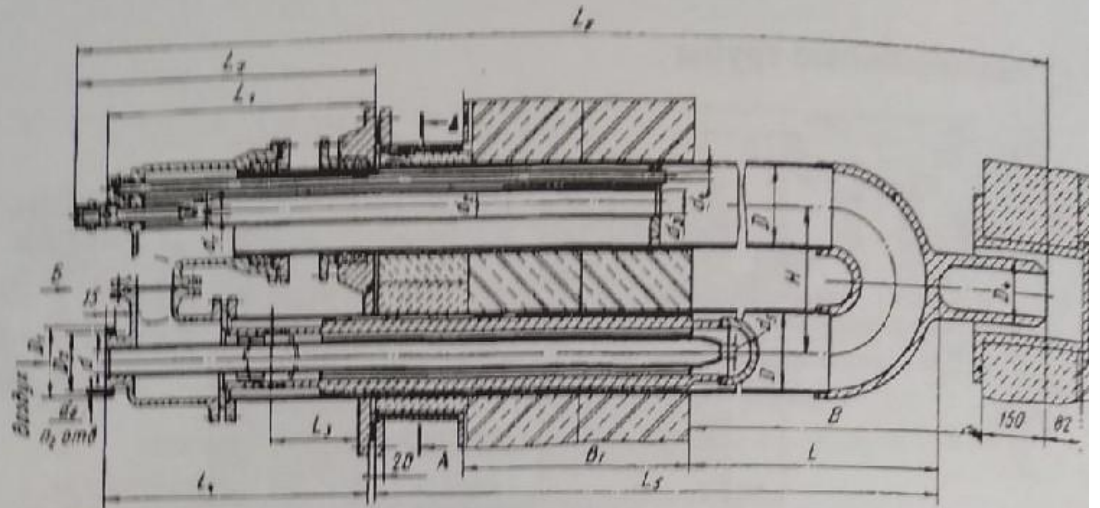


Рисунок 79 – U-образная радиационная труба с горелкой ВНИИМТ –

Стальпроект

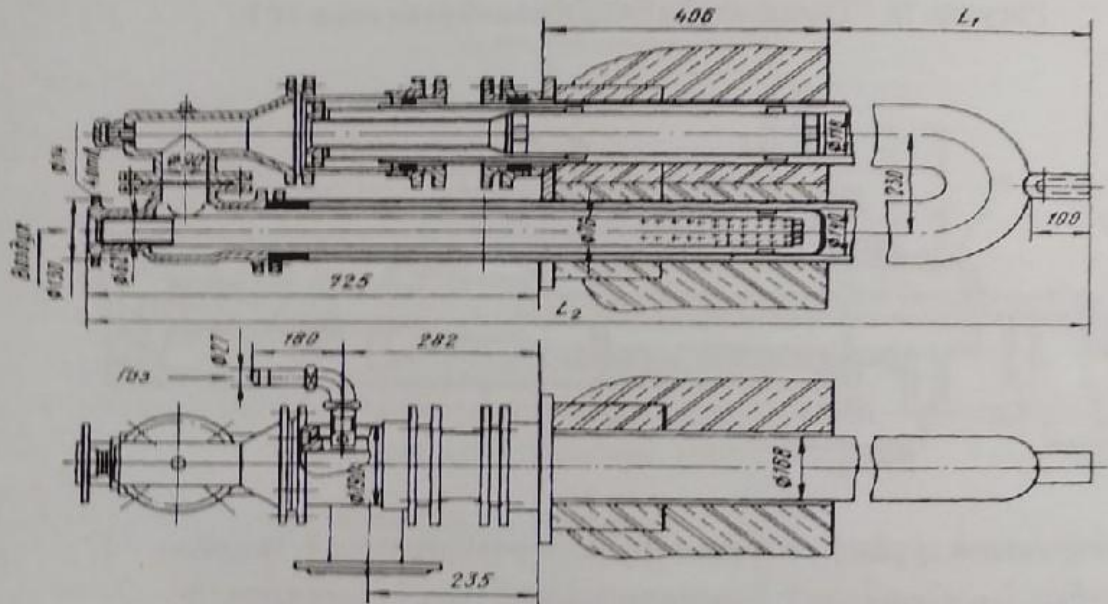
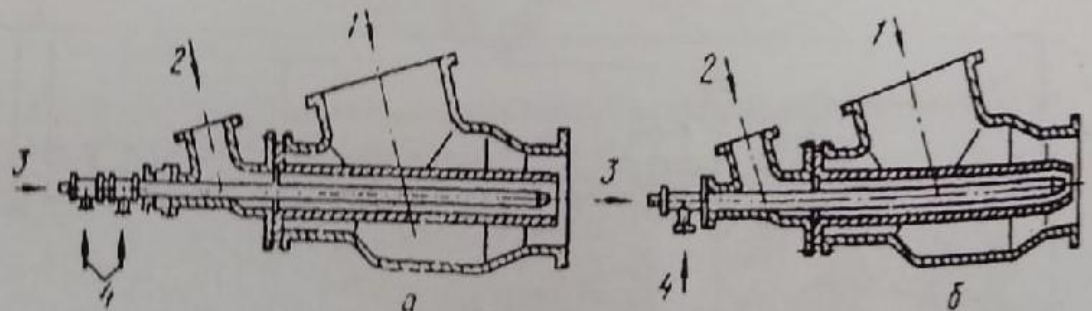


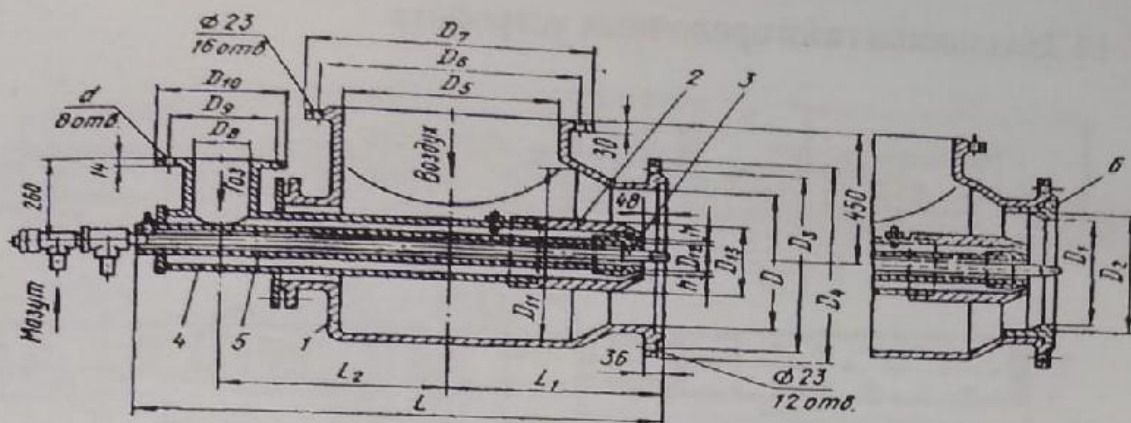
Рисунок 80 – U-образная радиационная труба типа ТРУ

### 13 Газомазутные горелки



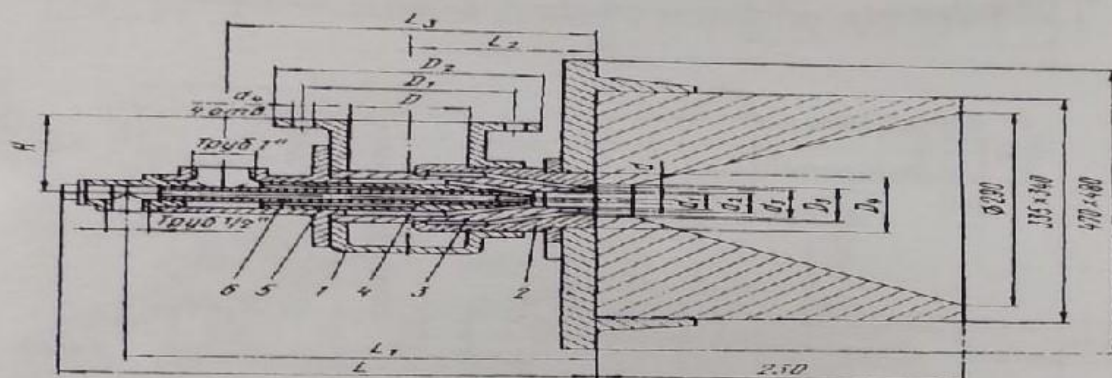
а – форсунка типа ФВД; б – форсунка типа ФК; 1 – воздух; 2 – газ; 3 – мазут; 4 – распылитель

Рисунок 81 – Размещение форсунок высокого давления



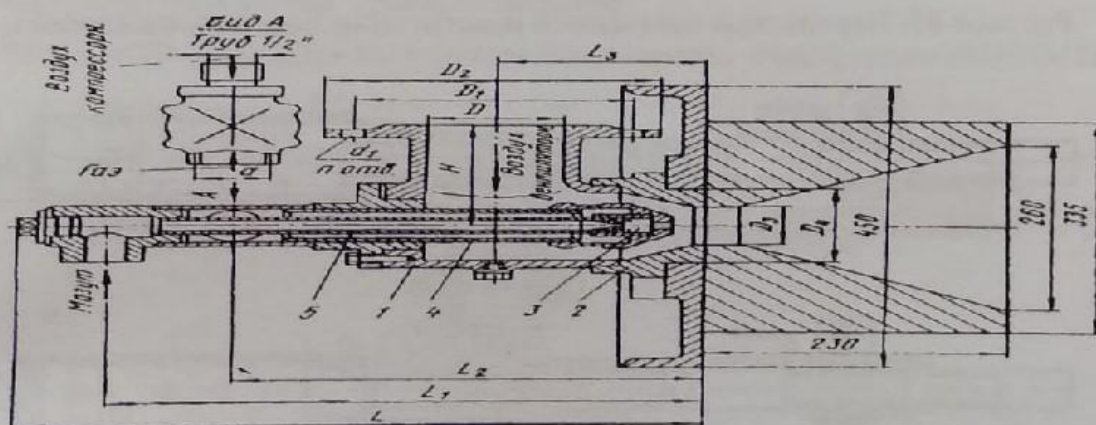
1- корпус горелки; 2- газовое сопло; 3- форсунка высокого давления; 4- газопроводящая труба; 5- центральная труба; 6- воздушная насадка

Рисунок 82. Газо-мазутные горелки для нагревательных печей завода «Серп и молот»



1- корпус; 2- насадка; 3- большая вихревая камера; 4- малая вихревая камера с эжектором; 5- газовая труба; 6- мазутная труба

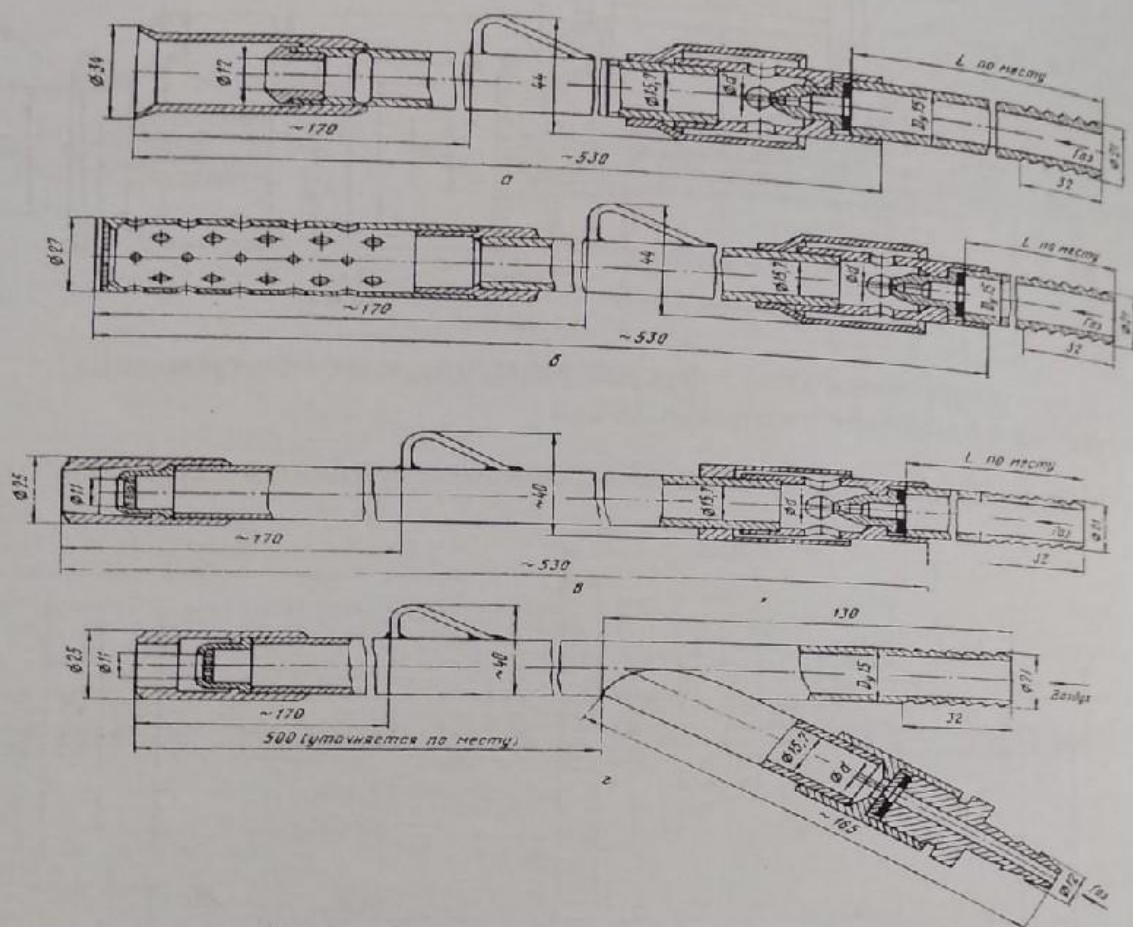
Рисунок 83. Газо-мазутные горелки типа ГКВГ



1- корпус; 2- насадка; 3- акустический излучатель; 4- газовая труба; 5- мазутная труба

Рисунок 84. Газо-мазутные горелки типа КГМГ-А

## 14 Запальники газогорелочных устройств



а- инжекционный однофакельный для работы при разрежении в рабочем пространстве печи; б- то же, многофакельный; в- инжекционный однофакельный для работы при избыточном давлении в рабочем пространстве печи; г- однофакельный двухпроводный

Рисунок 85- Переносные запальники конструкции Ленгипроинжпроекта

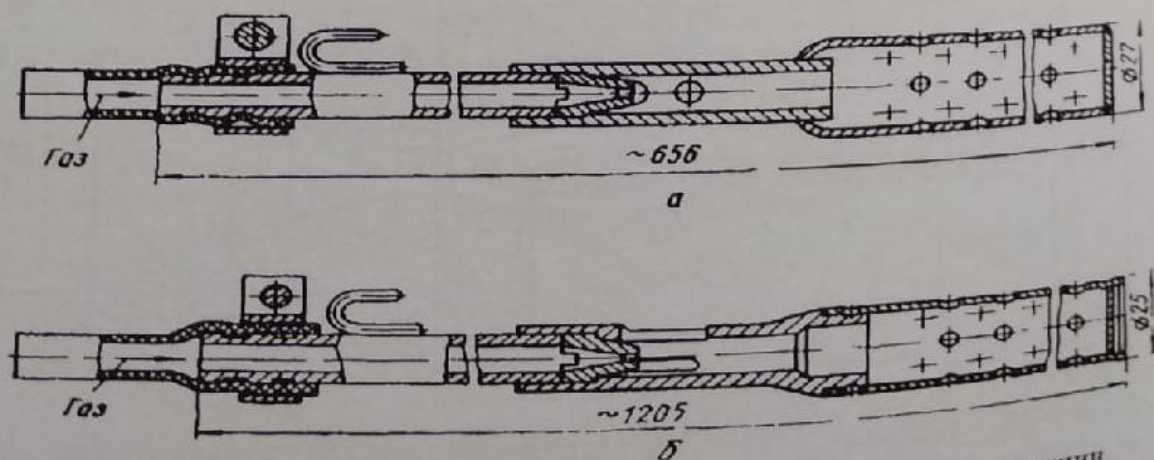
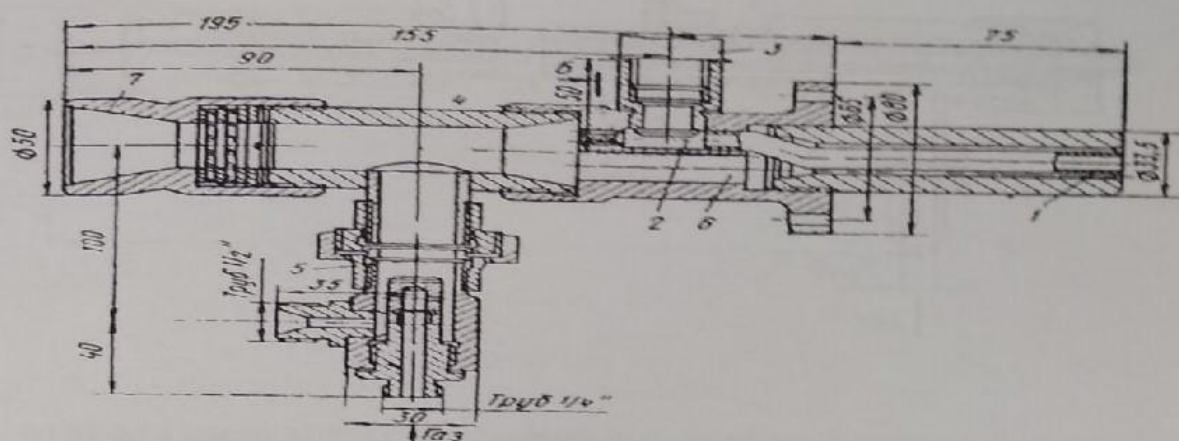
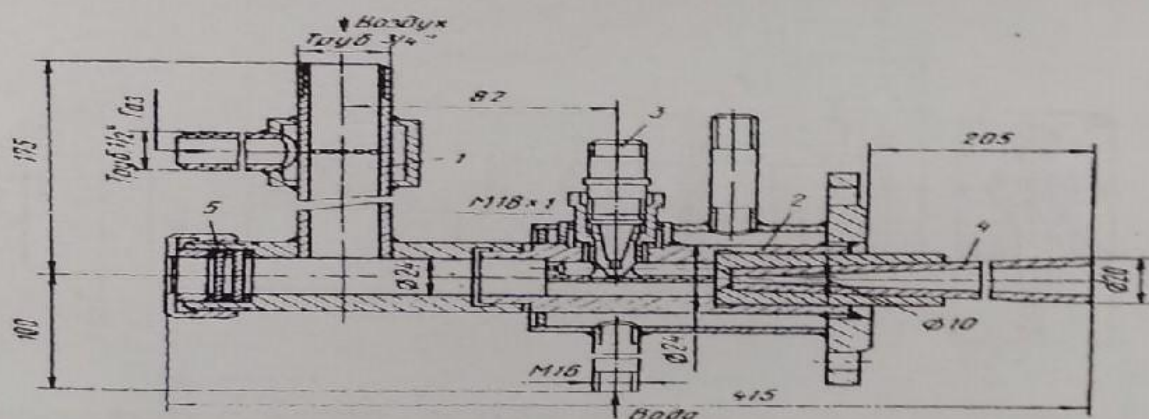


Рисунок 86- Переносные инжекционные запальники конструкции Мосгаэпроекта типа ИПЗ-1 (а) и ИПЗ-2 (б)



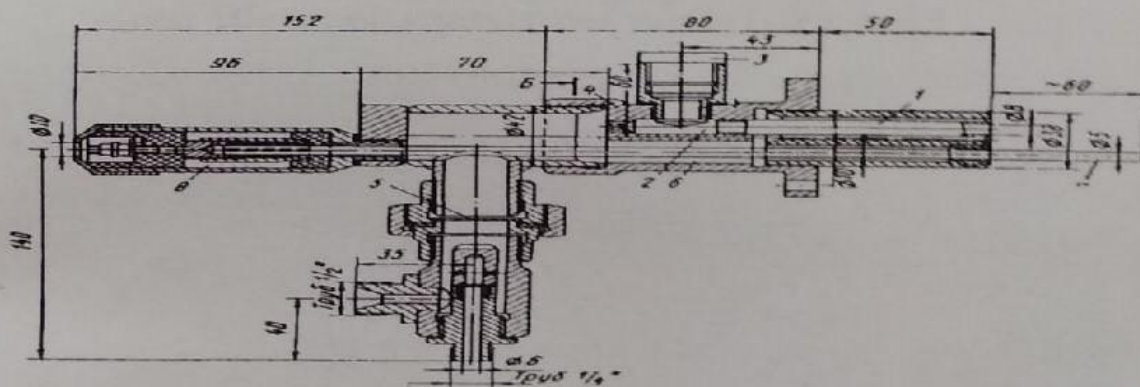
1- пламепровод; 2- камера зажигания; 3-автомобильная свеча;4- корпус запальника; 5- смеситель;6- основное отверстие;7- гляделка

Рисунок 87- Пилотно-запальное устройство типа ПЗУ-1



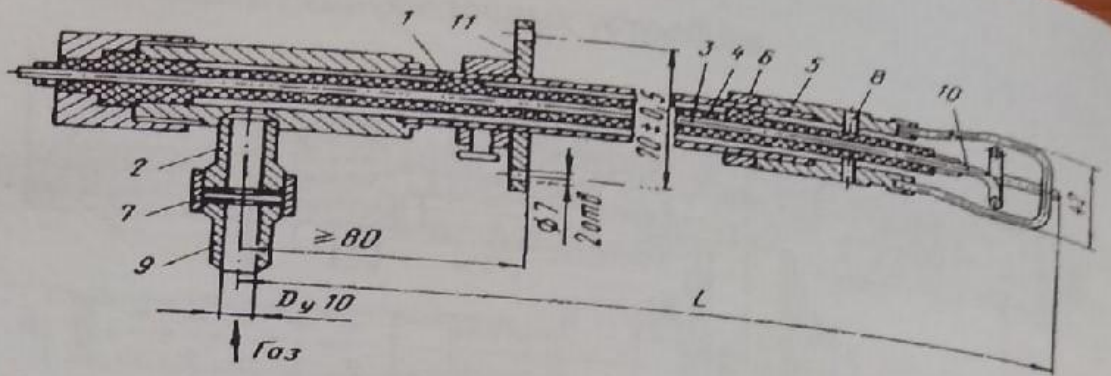
1- газо-воздушный смеситель; 2- корпус; 3- электрическая свеча;4- диффузорная корундовая труба; 5- гляделка

Рисунок 88- Дежурная электрозапальная горелка конструкции ВНИИМТа



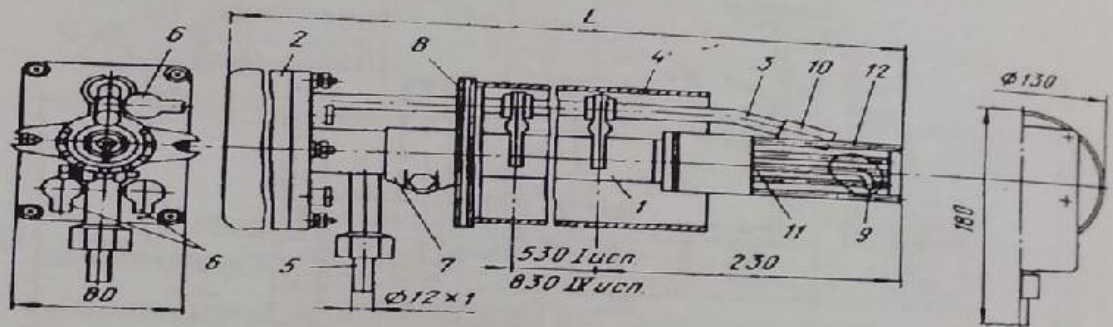
1- пламепровод; 2- камера зажигания; 3- автомобильная свеча; 4- корпус запальника;5- смеситель; 6- основное отверстие; 7- контрольный электрод; 8- держатель электрода.

Рисунок 89- Пилотно-защитное устройство типа ПЗУ



1- ствол; 2- штуцер; 3- центральный электрод; 4- керамическая изоляция; 5- наконечник; 6- контргайка; 7- дроссельная шайба; 8- регулировочный винт; 9- штуцер; 10- хвостовик центрального электрода; 11- фланец

Рисунок 90 - Запальник к ЗЗУ



1- труба запальника; 2- коробка; 3- контрольный электрод; 4- ограждающий корпус; 5- штуцер для подвода газа; 6- клеммы; 7- хомут; 8- фланец ограждающего корпуса; 9- стабилизатор пламени; 10- жиклер контрольного электрода; 11- сопло трубы запальника; 12- наконечник.

Рисунок 91 - Газовый электрозапальник типа ЭЗ завода

«Старорусприбор»

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

### ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА КОНВЕРСИИ УГЛЕВОДОРОДОВ, ГО- РЕЛОЧНЫХ И ФОРСУНОЧНЫХ УСТРОЙСТВ

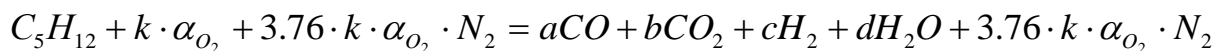
#### 1 Расчет конверсии углеводородных соединений

##### 1.1 Пример расчета воздушной конверсии

**Исходные данные:** газ пентан ( $C_5H_{12}$ ); коэффициент расхода воздуха при конверсии пентана равен 0.5; ориентировочная температура конверсии  $t_k=1250^0C$ .

Определить равновесный состав продуктов конверсии и ее температуру.

Конверсия пентана протекает по реакции:



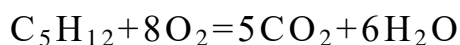
Для определения значений а, б, с, d составим балансовые уравнения по углероду, водороду и кислороду:

$$C \rightarrow a+b=5 \quad (1)$$

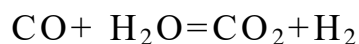
$$H_2 \rightarrow c+d=6 \quad (2)$$

$$O_2 \rightarrow a+2b+d=2k\alpha=2 \cdot 8 \cdot 0.5=8 \quad (3)$$

где  $k=8$  – коэффициент стоящий перед кислородом в реакции полного горения пентана.



Для определения величин а, б, с, d трех вышеприведенных балансовых уравнений недостаточно. Эту задачу можно решить воспользовавшись константой равновесия реакции водяного газа,  $K_p$ :





$$K_p = \frac{b \cdot c}{a \cdot d} \quad (4)$$

Константу равновесия реакции водяного газа можно рассчитать по уравнению (или принять по приложению В) в зависимости от температуры:

$$\lg k_p = \frac{2170.44}{T} + 5.094 \cdot 10^{-4} T - 8.163 \cdot 10^{-8} T^2 - 2.4417$$

где  $T=273+1250$ -заданная ориентировочная температура, К.

$$\lg k_p = -0.43 \quad k_p = 0.366$$

Решая систему из 4 уравнений находим:

$$a=4.1597; \quad b=0.84903; \quad c=3.84903; \quad d=2.15097$$

По полученным значениям проверим константу равновесия водяного газа при  $t=1250^{\circ}\text{C}$ :

$$K_p = \frac{b \cdot c}{a \cdot d} = \frac{0.84903 \cdot 3.84903}{4.15097 \cdot 2.15097} = 0.366$$

Равновесный состав продуктов конверсии:

$$V_{n.k} = V_{CO} + V_{CO_2} + V_{H_2} + V_{H_2O} + V_{N_2} = 4.15097 + 0.84903 + 2.150097 + 3.84903 + 15.04 = \\ = 26.04 \text{ м}^3 / \text{м}^3 \text{газа}$$

$$\text{где } V_{N_2} = 3.76 \cdot k \cdot \alpha = 3.76 \cdot 8 \cdot 0.5 = 15.04 \text{ м}^3 / \text{м}^3$$

Состав продуктов конверсии, %:

$$CO = \frac{a}{V_{n.k}} \cdot 100 = \frac{4.15097 \cdot 100}{26.04} = 15.94$$

$$CO_2 = \frac{b}{V_{n.k}} \cdot 100 = \frac{0.84903 \cdot 100}{26.04} = 3.26$$

$$H_2 = \frac{c}{V_{n.k}} \cdot 100 = \frac{3.84903 \cdot 100}{26.04} = 14.78$$

$$H_2O = \frac{d}{V_{n.k}} \cdot 100 = \frac{2.15097 \cdot 100}{26.04} = 8.26$$

$$N_2 = \frac{V_{N_2}}{V_{n.k}} \cdot 100 = \frac{15.04 \cdot 100}{26.04} = 57.76$$

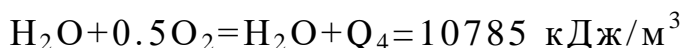
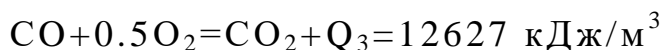
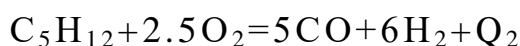
Определение температуры процесса конверсии:

$$t_{\text{кон}} = \frac{Q_{\text{кон}}}{V_{\text{п.к}} \cdot c_0^{t_{\text{кон}}}} \quad (5)$$

где  $Q_{\text{кон}}$  – тепловой эффект процесса конверсии, кДж/м<sup>3</sup>;

$c_0^t$  – теплоемкость продуктов конверсии, кДж/м<sup>3</sup>·К.

Для составления теплового баланса используются тепловые эффекты следующих реакций:



где  $Q_1 = 146077$  кДж/м<sup>3</sup> – тепловой эффект в реакции полного горения пентана (табл.Л1).

Согласно закону Гесса:

$$Q_1 = Q_2 + mQ_3 + n/2 \cdot Q_4$$

$$Q_1 = Q_2 + 5Q_3 + 6Q_4$$

$$Q_2 = Q_1 - 5Q_3 - 6Q_4 = 146077 - 5 \cdot 12627 - 6 \cdot 10785 = 18232 \text{ кДж/м}^3$$

$$Q_{\text{кон}} = Q_2 + b \cdot 12627 + c \cdot 10785 = 18232 + 0.849 \cdot 12627 + 2.150 \cdot 10785 = 52140 \text{ кДж/м}^3$$

Определяем теплоемкость продуктов конверсии при  $t = 1250^\circ\text{C}$

$$C_{\text{п.к}}^{t=1250} = \left( C_{CO}^{t=1250} \cdot \%CO + C_{CO_2}^{t=1250} \cdot \%CO_2 + C_{H_2}^{t=1250} \cdot \%H_2 + \right. \\ \left. + C_{H_2O}^{t=1250} \cdot \%H_2O + C_{N_2}^{t=1250} \cdot \%N_2 \right) \cdot 0.01 = \\ (2.2715 \cdot 15.94 + 2.2775 \cdot 3.26 + 1.348 \cdot 14.78 + 1.79 \cdot 8.26 + 1.42 \cdot 57.76) \cdot 0.01 = \\ = 1.603 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}}$$

Подставляем полученные величины в уравнение (5) и определяем температуру конверсии:

$$t_{\text{кон}} = \frac{52140}{26.04 \cdot 1.603} = 1249 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Так как принятая температура и рассчитанная отличаются на  $1^{\circ}\text{C}$ , то уточнение температуры не требуется.

$$t - t_{\text{рас}} \leq 5^{\circ}\text{C}$$

Определяем объем сухих продуктов конверсии путем охлаждения их до точки росы:

$$V'_{\text{п.к}} = V_{\text{п.к}} - d = 26.04 - 2.15097 = 23.889 \text{ м}^3/\text{м}^3 \text{ газа}$$

Состав сухих продуктов конверсии, %:

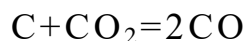
$$\text{CO} = \frac{a}{V'_{\text{п.к}}} \cdot 100 = \frac{4.15097 \cdot 100}{23.889} = 17.38$$

$$\text{CO}_2 = \frac{b}{V'_{\text{п.к}}} \cdot 100 = \frac{0.84903 \cdot 100}{23.889} = 3.55$$

$$\text{H}_2 = \frac{c}{V'_{\text{п.к}}} \cdot 100 = \frac{3.84903 \cdot 100}{23.889} = 16.11$$

$$\text{N}_2 = \frac{V_{\text{N}_2}}{V'_{\text{п.к}}} \cdot 100 = \frac{15.04 \cdot 100}{23.889} = 62.96$$

Очистку продуктов конверсии от углекислого газа производят путем пропускания их через раскаленный уголь ( $t_{\text{угля}} = 1200^{\circ}\text{C}$ ). При этом происходит восстановление углеродом  $\text{CO}_2$  до  $\text{CO}$  по реакции:



Тогда объем продуктов конверсии:

$$\begin{aligned} V''_{\text{п.к}} &= a + 2b + c + \text{N}_2 = 4.15907 + 2 \cdot 0.84903 + 3.84903 + 15.04 = \\ &= 24.738 \text{ м}^3/\text{м}^3 \text{ газа} \end{aligned}$$

Окончательный состав продуктов конверсии, %:

$$\text{CO} = \frac{a + 2b}{V''_{\text{п.к}}} \cdot 100 = \frac{(4.15097 + 2 \cdot 0.84903) \cdot 100}{24.738} = 23.64$$

$$\text{H}_2 = \frac{c}{V''_{\text{п.к}}} \cdot 100 = \frac{3.84903 \cdot 100}{24.738} = 15.56$$

$$\text{N}_2 = \frac{V_{\text{N}_2}}{V''_{\text{п.к}}} \cdot 100 = \frac{15.04 \cdot 100}{24.738} = 60.80$$

Пример 1.2. Определить равновесный состав продуктов кислородной конверсии метана при  $T = 1200\text{K}$  и  $k = 0.6$ .



Балансовые уравнения по углероду, водороду, кислороду (С, Н и О)

$$C \rightarrow a + b = 1$$

$$H \rightarrow c + d = 2$$

$$O \rightarrow a + 2b + d = 1,2$$

Для реакции водяного газа при  $T = 1200\text{K}$ ;  $\lg K_p = -0,138$ ;  $K_p = 0,7278$ .

Четвертое уравнение имеет вид  $b \cdot c = 0,7278a \cdot d$

Решая систему из четырех уравнений, находим,  $\text{м}^3 \text{н} \cdot \text{к} / \text{м}^3 \text{газа}$ :  $a = 0,94585$ ;  $b = 0,05415$ ;  $c = 1,85415$ ;  $d = 0,14585$ .

Равновесный состав продуктов конверсии, %:

$$\text{CO} = \frac{a}{a+b+c+d} \cdot 100 = \frac{0,94585}{3} \cdot 100 = 31,53;$$

$$\text{CO}_2 = \frac{b}{a+b+c+d} \cdot 100 = \frac{0,05415}{3} \cdot 100 = 1,80;$$

$$\text{H}_2 = \frac{c}{a+b+c+d} \cdot 100 = \frac{1,85415}{3} \cdot 100 = 61,81;$$

$$\text{H}_2\text{O} = \frac{d}{a+b+c+d} \cdot 100 = \frac{0,14585}{3} \cdot 100 = 4,96.$$

При использовании в качестве окислителя смесей кислорода с азотом в обеих частях уравнения конверсии появляется азот. Методика определения мольных долей  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  остается неизменной, а процентное содержание компонентов продуктов конверсии необходимо рассчитывать с учетом наличия в них азота.

Так, если в предыдущем примере концентрация кислорода в смеси с азотом будет 40%, то смесь газов будет содержать  $0.6 \cdot \frac{60}{40} = 0.9$  моля азота на один моль метана, или  $\text{м}^3$  азота на один  $\text{м}^3$  метана. Тогда продукты конверсии будут иметь следующий состав, %:

$$CO = \frac{0.94585}{3.9} \cdot 100 = 24.25; \quad CO_2 = 1.39;$$

$$H_2 = 47.54; \quad H_2O = 3.74; \quad N_2 = 23.08$$

Пример 1.3. Определить равновесный состав продуктов паровой конверсии метана при  $T=1100$  К и  $\frac{O}{C} = 1.2$ .



Тогда балансовые уравнения по С, Н и О

$$C \rightarrow a + b = 1;$$

$$H \rightarrow c + d = 3.2;$$

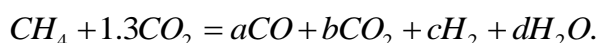
$$O \rightarrow a + 2b + d = 1.2.$$

При  $T=1100$  К для реакции водяного газа  $\lg K_p = -0.007$ ;  $K_p = 0.9840$

Решая систему из четырех уравнений, получим,  $\text{м}^3 \text{п} \cdot \text{к} / \text{м}^3 \text{газа}$ ,  
 $a=0.95294$ ;  $b= 0,04708$ ;  $c=3.04706$ ;  $d=0,15294$ . Этим данным соответствует следующий состав продуктов конверсии (% объемн.):  $CO=22,69$ ;  $CO_2=1,12$ ;  $H_2=72,55$ ;  $H_2O=3,64$ .

Пример 1.4. Определить равновесный состав продуктов углекислотной конверсии металла при  $T=1100$  К и  $CO_2:CH_4=1.3$ .

Уравнение реакции конверсии



Балансовые уравнения по С, Н и О

$$C \rightarrow a + b = 2.3;$$

$$H \rightarrow c + d = 2;$$

$$O \rightarrow a + 2b + d = 2.6.$$

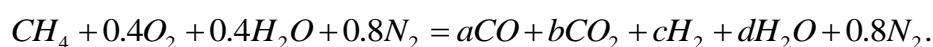
При  $t = 1100\text{К}$ :  $\lg K_p = -0.007$ ;  $K_p = 0.984$ . Решая систему из четырех уравнений, получим,  $\text{м}^3 \text{п} \cdot \text{к} / \text{м}^3 \text{газа}$  :  $a= 2.1407$ ;  $b= 0,1593$ ;  $c= 1.8593$ ;  
 $d= 0.1707$ .

В этом случае равновесный состав продуктов конверсии, %:  $CO = 49.78$ ;  $CO_2 = 3.70$ ;  $H_2 = 43.25$ ;  $H_2O = 3.27$

Нередко встречаются случаи, когда в качестве окислителя используют смеси, состоящие из  $O_2$ ,  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $N_2$  или части из них. В этих случаях методика определения равновесного состава продуктов конверсии остается неизменной.

Пример 1.5. Определить равновесный состав продуктов конверсии метана при  $T=1200$  К смесью, состоящей из 25%  $O_2$ , 25%  $H_2O$  и 50%  $N_2$ , при отношении смеси к метану, равном 1.6

Уравнение реакции конверсии



Балансовые уравнения по С, Н и О

$$C \rightarrow a + b = 1;$$

$$H \rightarrow c + d = 2.4;$$

$$O \rightarrow a + 2b + d = 1.2.$$

При  $T=1200$  К  $\lg K_p = -0.138$ ;  $K_p = 0.7278$ . Решая систему из четырех уравнений получим:  $a = 0.95284$ ;  $b = 0.04716$ ;  $c = 2.24716$ ;  $d = 0.15284$ .

Тогда равновесный состав продуктов конверсии составит, %:  
 $CO = 22.69$ ;  $CO_2 = 1.12$ ;  $H_2 = 53.50$ ;  $H_2O = 3.64$ ;  $N_2 = 19.05$ .

Аналогичным способом решаются подобные задачи, если конверсии подвергаются, не метан, а другой углеводород  $C_mH_n$  или смесь углеводородов. Для смеси углеводородов можно пользоваться условной химической формулой. Тогда в общем виде условная химическая формула содержит углерод, водород, кислород, азот, серу. Содержание кислорода, азота и серы, как правило, не превышает нескольких процентов, поэтому с достаточной точностью можно считать, что смесь углеводородов состоит из углерода и водорода.

Расчет условной химической формулы производится следующим образом. Дана смесь углеводородов: 30%  $CH_4$ , 20%  $C_2H_6$  и 50%  $C_3H_8$ , в этом случае

$$n = \frac{1 \cdot 30 + 2 \cdot 20 + 3 \cdot 50}{100} = 2.2; \quad m = \frac{4.30 + 6.20 + 8.50}{100} = 6.4$$

Условная химическая формула такой смеси будет  $C_{2.2}H_{6.4}$ . Пусть смесь этих углеводородов подвергается паровой конверсии при  $T=1100$  К и  $\frac{O}{C} = 1.3$ .

Реакцию конверсии можно записать двумя способами:

- первый  $0.3CH_4 + 0.2C_2H_4 + 0.5C_3H_8 + 2.86H_2O = aCO + bCO_2 + cH_2 + dH_2O$ ;

- второй  $C_{2.2}H_{6.4} + 2.86H_2O = aCO + bCO_2 + cH_2 + dH_2O$ .

Термодинамические расчеты равновесных составов продуктов конверсии углеводородов по второму варианту проще, хотя и требуют несложных предварительных расчетов. Система расчетных уравнений

$$C \rightarrow a + b = 2.2;$$

$$H \rightarrow c + d = 6.06;$$

$$O \rightarrow a + 2b + d = 2.86;$$

$$K_p = \frac{b \cdot c}{a \cdot d} = 0.984.$$

Решая систему из четырех уравнений, получим,  $m^3 \text{ н.к.} / m^3 \text{ газа}$ :  $a = 2.0261$ ;  
 $b = 0.1739$ ;  $c = 5.5739$ ;  $d = 0.4861$ .

Тогда равновесный состав продуктов конверсии составит, %:  
 $CO = 24.53$ ;  $CO_2 = 2.11$ ;  $H_2 = 67.48$ ;  $H_2O = 5.88$ .

Намного сложнее определение равновесных составов продуктов конверсии углеводородов с учетом остаточного метана. В общем виде реакция конверсии имеет вид:



В первой части уравнения содержится пять неизвестных. Для их определения необходимо пять уравнений. Четыре уравнения составляют аналогично рассмотренной ранее методике:

$$C \rightarrow a + b + l = n + (l);$$

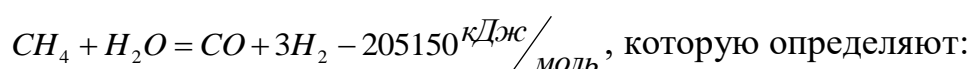
$$H \rightarrow c + d + 2b = \frac{m}{2} + (p);$$

$$O \rightarrow a + 2b + d = 2k + (p) + (2l);$$

$$Kp = \frac{b \cdot c}{ad}$$

Здесь  $(l)$  и  $(p)$  учитываются в уравнениях при использовании в качестве окислителя  $H_2O$  и  $CO_2$ .

В качестве пятого уравнения используют константу равновесия реакции

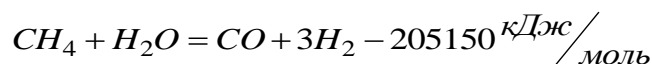


$$Kp = \frac{P_{CO} \cdot P_{H_2}^3}{P_{CH_4} \cdot P_{H_2O}}$$

Определив значения парциальных давлений по аналогии с уравнениями и подставив их значения в уравнение константы равновесия реакции, получим:

$$Kp = \frac{a \cdot c^3 (P_{об} \cdot 10^{-5})^2}{e \cdot d (a + b + c + d + e)^2},$$

где  $P_{об}$  - абсолютное давление в аппарате конверсии.



Значение логарифма константы равновесия реакции приведены в приложении В.

Если в предыдущих расчетах в уравнении не фигурировало давление в системе, то при расчете остаточного метана уже нельзя его не учитывать. Содержание остаточного метана зависит от давления в системе. Теоретические расчеты и практика показывают, что с ростом давления в системе содержание остаточного метана в продуктах конверсии углеводородов увеличивается.



Обычным путем решить полученную систему из пяти уравнений невозможно, т.к. после преобразования получается уравнение пятой степени. Поэтому такие задачи решаются либо на ЭВМ по специально разработанной программе, либо методом последовательных приближений.

Пример 1.6 Определить равновесный состав продуктов конверсии метана при  $T=1100\text{K}$  и абсолютном давлении в аппарате конверсии  $P_{аб} = 2 \cdot 10^5 \text{Па}$  по следующей реакции:



По аналогии с предыдущими примерами составим балансовые уравнения:

$$\begin{aligned} C &\rightarrow a + b + e = 1; \\ H &\rightarrow c + d + 2e = 3,2; \\ O &\rightarrow a + 2b + d = 1,2; \\ b \cdot c &= 0,984 \cdot a \cdot d. \end{aligned}$$

При  $T=1100\text{K}$  для реакции  $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} = \text{CO} + 3\text{H}_2 - 205150 \text{ кДж/моль}$   $\lg K_p = 2,475$ ;  $K_p = 298,5382$ . Следовательно,

$$\frac{a \cdot c^3}{(1 + c + d)^2 e \cdot d} P_{аб}^2 = 298,5382;$$

$$P_{аб} = 2,0 \cdot 10^5 \cdot 10^{-5} = 2,0 \quad e = \frac{a \cdot c^3}{74,63455(1 + c + d)^2}.$$

Условно принимаем, что  $e = 0,1$ . Тогда система балансовых уравнений будет иметь вид:

$$\begin{aligned} C &\rightarrow a + b = 0,9; \\ H &\rightarrow c + d = 3,0; \\ O &\rightarrow a + 2b + d = 1,2; \\ bc &= 0,984a \cdot d. \end{aligned}$$

Решая полученные уравнения, получим,  $\text{м}^3 \text{п.к} / \text{м}^3 \text{газа}$ :  $a = 0,83157$ ;  $b = 0,06843$ ;  $c = 2,76843$ ;  $d = 0,23157$ .

При таких значениях  $a$ ,  $b$ ,  $c$  и  $d$

$$e = \frac{0,83157 \cdot 2,76843^3}{74,63455 \cdot 0,23157 \cdot 16} = 0,0636.$$

Полученное значение  $e$  отличается от принятого.

Принимаем новое значение  $e=0,08$ , тогда  $a=0,8557$ ;  $b=0,0649$ ;  
 $c= 2,76843$ ;  $d= 0,23157$ .

Рассчитанное по этим данным  $e=0,073367$ . Повторяя операции приближения, получим  $e=0,076$ ;  $a=0,86054$ ;  $b=0,06346$ ;  $c=2,83546$ ;  $d= 0,21254$

Химсостав продуктов конверсии будет следующим, %:  $\text{CO}_2=1,57$ ;  
 $\text{CO}=21,26$ ;  $\text{H}_2=70,04$ ;  $\text{H}_2\text{O}=5,25$ ;  $\text{CH}_4=1,88$ .

Пример 1.7 Определить равновесный состав продуктов кислородной конверсии метана при  $k = 0,6$ .

Принимаем температуру конверсии  $950^\circ\text{C}$ .



Балансовые уравнения по С, Н и О:

$$C \rightarrow a + b = 1;$$

$$H \rightarrow c + d = 2;$$

$$O \rightarrow a + 2b + d = 1,2.$$

По уравнению при  $T = (950 + 272) \text{ K}$ ,  $\lg K_p = -0,1661$ ,  $K_p = 0,6822$ .

$$K_p = \frac{b \cdot c}{a \cdot d}.$$

Решая систему из четырех уравнений, получим,  $\text{м}^3 \text{п.к}/ \text{м}^3 \text{газа}$ :  
 $a=0,94822$ ;  $b=0,05178$ ;  $c=1,85178$ ;  $d=0,14822$ . Тогда состав продуктов конверсии, %:  $\text{CO} = 31,60$  ;  $\text{CO}_2 = 1,73$  ;  $\text{H}_2\text{O} = 4,94$  ;  $\text{H}_2 = 61,73$  .

Тепловой эффект реакции конверсии

$$\begin{cases} \text{CH}_4 + 0,6\text{O}_2 = \text{CO} + 2\text{H}_2 + 1626 \text{кДж} \\ + \left\{ \begin{array}{l} 0,05178\text{CO} + 0,02589\text{O}_2 = 0,05178\text{CO}_2 + 0,05178 \cdot 12627 \text{кДж} \\ 0,14822\text{H}_2 + 0,07411\text{O}_2 = 0,14822\text{H}_2\text{O} + 0,14822 \cdot 10785 \text{кДж} \end{array} \right. \\ \hline \text{CH}_4 + 0,6\text{O}_2 = 0,94822\text{CO} + 0,05178\text{CO}_2 + 1,85178\text{H}_2 + 0,14822\text{H}_2\text{O} + 3878,4 \text{кДж} \end{cases}$$

$$Q=3878,4 \text{ кДж}.$$

Теплоемкость продуктов конверсии при 950°С.

$$C_{п.к.}^{950} = 0,01(CO \cdot C_{CO}^{950} + CO_2 \cdot C_{CO_2}^{950} + H_2^{950} + H_2O \cdot C_{H_2O}^{950}) =$$

$$0,01(31,6 \cdot 1,4089 + 1,73 \cdot 2,2091 + 61,73 \cdot 1,3252 + 4,94 \cdot 1,6999) = 1,3855 \text{ кДж} / \text{м}^3 \cdot \text{К}$$

Калориметрическая температура конверсии

$$t_{кон} = \frac{Q}{C_{п.к.}^{950} \cdot V_{п.к.}} = \frac{3878,4}{1,3855 \cdot 3} = 933^\circ \text{С.}$$

Полученное значение температуры отличается от принятой. Принимаем новое значение температуры конверсии  $t = 940^\circ \text{С}$ .

Расчет повторяем. При  $T = 940 + 272 \text{ К}$ ;  $\lg K_p = -0,1546$ ;  $K_p = 0,7004$ .

Система балансовых уравнений по С, Н<sub>2</sub> и О осталась той же. Тогда:  $a=0,94727$ ;  $b= 0,05273$ ;  $c= 1,05273$ ;  $d= 0,14727$ , а состав продуктов конверсии, %:  $CO = 31,58$ ;  $CO_2 = 1,76$ ;  $H_2 = 61,75$ ;  $H_2O = 4,91$ ,  $Q=3880,1 \text{ кДж} / \text{м}^3$

Теплоемкость продуктов конверсии при  $t = 940^\circ \text{С}$

$$C_{п.к.}^{940} = 0,01(CO \cdot C_{CO} + CO_2 \cdot C_{CO_2} + H_2 \cdot C_{H_2} + H_2O \cdot C_{H_2O}) = 0,01(31,58 \cdot 1,4076 + 1,76 \cdot 2,2055 + 61,75 \cdot 1,3247 + 4,91 \cdot 1,6972) = 1,304 \text{ кДж} / \text{м}^3 \text{К. Тогда}$$

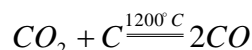
$$t = \frac{3882,1}{1,3040 \cdot 3} = 935^\circ \text{С.}$$

Разница между принятой и расчетной температурами составляет 5°С, тогда принимаем температуру конверсии 935°С. Для получения защитного или восстановительного газа необходимо очистить продукты конверсии от Н<sub>2</sub>О и СО<sub>2</sub>.

Охлаждаем продукты конверсии до точки росы и освобождаем их от воды. Тогда сухой объем продуктов конверсии будет равен:

$$V_{п.к.}' = a + b + c - d = 0,947 + 0,053 + 1,853 - 0,147 = 2,85 \frac{\text{м}^3 \text{п.к.}}{\text{м}^3 \text{газа}}$$

Пропуская продукты конверсии через раскаленный уголь, температура которого больше 1200° С, освобождаемся от СО<sub>2</sub> по реакции:



Тогда окончательный объем продуктов конверсии равен

$$V_{н.к.}'' = a + 2b + c = 0,947 + 2 \cdot 0,053 + 1,853 = 2,906 \text{ м}^3 \text{ н.к.} / \text{ м}^3 \text{ газа}$$

После чего определяем окончательный состав продуктов конверсии, %

## 2 Пример расчета газовой прямоточной дутьевой горелки полного предварительного смешения с многоструйной подачей газа (рисунок 1.12)

**Исходные данные:** Топливо-природный газ. Параметры:

теплота сгорания  $Q_H^c = 34928 \text{ кДж/м}^3$ ; теоретический расход, воздуха на горение,  $V_B^0 = 12,3 \text{ м}^3/\text{м}^3$ ; плотность газа  $\rho_r = 0,96 \text{ кг/м}^3$ ; температура газа,  $t_r = 10^\circ\text{C}$ ; избыточное, давление газа перед горелкой  $P_{1r} = 2000 \text{ Па}$ . Расход газа при номинальной тепловой мощности  $V_{o_2}^0 = 0,0124 \text{ м}^3/\text{с}$ . Необходимый коэффициент рабочего регулирования горелки по тепловой мощности  $k_{р.р} = 6$ . Коэффициент расхода воздуха  $\alpha = 1,04$ . Параметры дутьевого воздуха: температура  $t_B = 200^\circ\text{C}$ ; плотность  $\rho_B = 0,746 \text{ кг/м}^3$ . Параметры газозвушной смеси: температура  $t_{см} = 178^\circ\text{C}$ ; плотность  $\rho_{см} = 0,77 \text{ кг/м}^3$ ; коэффициент температуропроводности  $a_{см} = 51 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ; нормальная скорость распространения пламени  $U_n = 0,52 \text{ м/с}$ . Избыточное давление в камере сгорания  $P_{к.сг} = -30 \text{ Па}$ .

**Расчет воздушного канала горелки.** Расход воздуха через горелку:

$V_g = \alpha \cdot v_g^0 \cdot V_o^0 \cdot (t_g + 273)/273 = 1,04 \cdot 12,3 \cdot 0,0124 \cdot (200 + 273)/273 = 0,275 \text{ м}^3/\text{с}$   
Массовая скорость воздуха в воздушном канале  $\omega_B \rho_B = 20 \text{ кг}/(\text{м}^2\text{с})$ , тогда линейная скорость воздуха:

$$W_B = 20/\rho_B = 20/0,746 = 26,8 \text{ м/с}$$

Внутренний диаметр воздушного канала горелки:

$$D_B = \sqrt{4V_B / (\pi \cdot W_B)} = \sqrt{4 \cdot 0.275 / (3.14 \cdot 26.8)} = 0.114 \text{ м}$$

Воздушный канал горелки выполняется из стандартной электросварной трубы наружным диаметром  $D_{в.нар}=127$  мм, толщиной стенки 4 мм. Уточненное значение скорости воздуха  $W_B=24,7$  м/с.

Диаметр выходного сечения горелки определяют с учетом обеспечения заданного значения коэффициента  $k_{раб.рег}$  по формуле:

$$D_{вых} = 5.2 \cdot \sqrt[3]{V_{см} \cdot a_{см} / (k_{раб.рег} \cdot U_n^2 \cdot \varepsilon)} = 5.2 \cdot \sqrt[3]{0.283 \cdot 51 \cdot 10^{-6} / (6 \cdot 0.52^2 \cdot 0.97)} = 0.11 \text{ м} = 110 \text{ мм}$$

где  $\varepsilon=0,97$ -коэффициент сужения струи в конфузоре горелки при принятом центральном угле конфузора  $\beta=15^\circ$ ;  $V_{см}$  - расход смеси:

$$V_{см} = V_{г}^0 (1 + \alpha \cdot V_B^0) (t_{см} + 273) / 273 = 0.0124 (1 + 1.04 \cdot 12.3) (178 + 273) / 273 = 0.283 \text{ м}^3 / \text{с}$$

Длина конфузора:

$$L_{кон} = (D_B - D_{вых}) / 2 \operatorname{tg}(\beta / 2) = (119 - 110) / 2 \operatorname{tg}(15 / 2) = 34 \text{ мм}$$

Коэффициент сопротивления конфузора:

$$\xi_{кон} = 0.5 [1 - (D_{вых} / D_B)^2] \sin(\beta / 2) = 0.5 [1 - (110 / 119)^2] \sin(15 / 2) = 0.01$$

Скорость истечения газовой смеси из горелки при номинальной тепловой мощности:

$$W_{см} = V_{см} / (0.785 D_{вых}^2 \cdot \varepsilon) = 0.283 / (0.785 \cdot 0.11^2 \cdot 0.97) = 30.8 \text{ м/с.}$$

Необходимое полное давление воздуха перед горелкой:

$$P_B = k(1 + \xi_{кон}) \cdot W_{см}^2 \cdot \rho_{см} / 2 \pm P_{к.ст} = 1.1(1 + 0.01) \cdot 30.8^2 \cdot 0.77 / 2 - 30 = 375 \text{ Па}$$

где  $k=1,1$ —коэффициент запаса.

Статическое давление воздуха в воздушном канале:

$$P_{в.ст} = P_B - \omega_B^2 \cdot \rho_B / 2 = 375 - 24.7^2 \cdot 0.746 / 2 = 150 \text{ Па.}$$

**Расчет газовыпускных отверстий.** Оптимальная глубина проникновения газовых струй в воздушный поток:

$$h=0.2D_B=0,2 \cdot 119=24 \text{ мм.}$$

В соответствии с вышеизложенным принимают  $t/D_{стр}=1,5$  и определяют оптимальное число газовыпускных отверстий:

$$n = \pi(D_g - 2h)/0.75h(t/D_{стр}) = 3.14(119 - 2 \cdot 24)/(0.75 \cdot 24 \cdot 1.5) = 8$$

Необходимый диаметр газовыпускных отверстий определяют по формуле для отверстий в топкой стенке принимают коэффициент скорости  $\varphi=0.97$ , коэффициент живого сечения  $\varepsilon=0.64$ . При угле атаки газовых струй  $\psi=90^\circ$ , коэффициент  $k_\psi=1$ . Предварительно принимают коэффициент  $k_s=1.6$ . Значение коэффициента  $\eta$  определяют по формуле:

$$\eta = (G_g + G_z)/G_g = V_{см} \cdot \rho_{см} / (V_g \cdot \rho_g) = 0.283 \cdot 0.77 / (0.275 \cdot 0.746) = 1.06$$

Расход газа через газовыпускные отверстия:

$$V_z = V_z^0 (t_z + 273) / 273 = 0.0124(10 + 273) / 273 = 0.0128 \text{ м}^3 / \text{с}$$

Тогда необходимый диаметр газовыпускных отверстий:

$$d = k_s \cdot k_\psi \cdot V_r \cdot 10^6 \cdot \sqrt{\rho_r / \rho_B} / (0.785h \cdot \eta \cdot \varepsilon \cdot n \cdot W_B) = \\ = 1.6 \cdot 1 \cdot 0.0128 \cdot 10^6 \cdot \sqrt{0.96 / 0.746} / (0.785 \cdot 24 \cdot 1.06 \cdot 0.64 \cdot 8 \cdot 10^{-6}) = 9.2 \text{ мм}$$

Необходимая скорость истечения газа из газовыпускных отверстий:

$$W_r = V_r / (0.785d^2 \cdot \varepsilon \cdot n \cdot 10^{-6}) = 0.0128 / (0.785 \cdot 9.2^2 \cdot 0.64 \cdot 8 \cdot 10^{-6}) = 37.7 \text{ м/с.}$$

Максимально возможную скорость истечения газа из отверстий находят по формуле :

$$W_{r, \text{макс}} = \varphi \cdot \sqrt{2(P_{лг} - P_{в.ст}) / \rho_r} = 0.97 \cdot \sqrt{2(2000 - 150) / 0.96} \approx 60 \text{ м/с.}$$

Таким образом, располагаемое давление газа перед горелкой обеспечивает необходимую скорость его истечения

из газовыпускных отверстий.

При  $d=9,2$  мм в толщине стенки воздушного канала  $\delta=4$ мм имеется отверстие в тонкой стенке. Следовательно, значения коэффициентов  $\varphi$  и  $\varepsilon$  приняты правильно. Затем вычисляют значение коэффициента  $k_s$ :

$$k_s = 1.5 + 0.026s/d = 1.5 + 0.026 \cdot \pi \cdot D_g / (\pi \cdot d) = 1.5 + 0.026 \cdot 3.14 \cdot 119 / (8 \cdot 9.2) = 1.63$$

Полученное значение  $k_s$  практически совпадает с принятым, поэтому расчет не нуждается в уточнении.

### **Длина смесителя и размеры газового коллектора.**

Для горелок с полным предварительным смешением длину смесителя принимают равной:

$$L_{CM} = 30d = 30 \cdot 9,2 \approx 280 \text{ мм.}$$

Диаметр газового патрубка определяют по скорости газа  $\omega_r = 15$  м/с:

$$d_r = \sqrt{V_r / (0.785 \cdot W_r)} = \sqrt{0.0128 / (0.785 \cdot 15)} = 0.033 \text{ м} = 33 \text{ мм.}$$

Сечение газового коллектора и его внутренний диаметр рассчитывают с пониженной скоростью газа  $\omega_r = 5$  м/с с целью обеспечения равномерного распределения газа по газовыпускным отверстиям:

$$F_r = V_r / W_r = 0,0128 / 5 = 0,00256 \text{ м}^2.$$

В соответствии с рекомендациями длину газового коллектора принимают равной:

$$L_r = 3d_r = 3 \cdot 33 \approx 100 \text{ мм.}$$

Внутренний диаметр газового коллектора определяют по формуле:

$$D_r = D_{в.нар} + 2F_r / L_r = 127 + 2 \cdot 0.00256 \cdot 10^6 / 100 = 178 \text{ мм}$$

### 3 Пример расчета инжекционной горелки

**Исходные данные:** Тепловая мощность горелки  $Q_{\Gamma}=0.25$  МВт, давление газа перед горелкой,  $P_{\Gamma}=2.4$  кПа, теплота сгорания газа  $Q_{\text{н}}^{\text{п}}=18489$  кДж/м<sup>3</sup>, расход воздуха 4.28 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> газа, плотность газа  $\rho_{0\Gamma}=0.486$  кг/м<sup>3</sup>.

Определяем секундный расход газа, м<sup>3</sup>/с:

$$V_{\Gamma} = \frac{Q_{\Gamma}^{\text{ном}}}{Q_{\text{н}}^{\text{п}}} = \frac{0.8 \cdot Q_{\Gamma}}{Q_{\text{н}}^{\text{п}}} = \frac{0.8 \cdot 0.25}{18.489} = 0.011$$

где  $Q_{\Gamma}^{\text{ном}}$  – номинальная тепловая мощность, кВт;

$Q_{\text{н}}^{\text{п}}$  – теплота сгорания топлива, кДж/м<sup>3</sup>.

Массовый коэффициент инжекции:

$$U = \alpha \cdot V_0 \cdot \frac{\rho_{0\text{в}}}{\rho_{0\Gamma}} = 0.6 \cdot 4.28 \cdot \frac{1.288}{0.486} = 6.8$$

где  $\alpha'=0.3...0.6$  – коэффициент первичного расхода воздуха;

$V_0$  – расход воздуха для сжигания 1м<sup>3</sup> газа при нормальных условиях, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;

$\rho_{0\Gamma}, \rho_{0\text{в}}$  – плотность газа и воздуха при нормальных условиях, кг/м<sup>3</sup>.

Объемный коэффициент инжекции:

$$i = \alpha \cdot V_0 = 0.6 \cdot 4.28 = 2.568 \text{ м}^3/\text{м}^3$$

Скорость истечения газов при  $P_{\Gamma} \leq 10000$  Па:

$$W_2 = \varphi \cdot \sqrt{\frac{2P_{\Gamma}}{\rho_{\Gamma}}} = 0.97 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 2400}{0.486}} = 99.4 \text{ м/с}$$

где  $P_{\Gamma}$  – давление газа, Па;

$\varphi=0.97$  – коэффициент скорости;

$\rho_{\Gamma}$  – плотность газа, кг/м<sup>3</sup>.

Площадь газового сопла:  $f_c = \frac{V_2}{W_2} = \frac{0.011}{99.4} = 0.00011 \text{ м}^2$



Диаметр газового сопла,  $d_c = d_1$ ;  $f = \pi d_1^2 / 4$

$$d_1 = \sqrt{\frac{4f}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0.00011}{3.14}} = 0.012 \text{ м}$$

Диаметр смесителя определяем:

$$d_3 = d_1 \sqrt{(1+i)(1+U)(1+\xi/2)} = 0.012 \sqrt{(1+2.57)(1+6.8)(1+0.2/2)} = 0.042 \text{ м}$$

где  $i$  – кратность инъекции;

$\xi = 0.2$  – суммарный коэффициент сопротивления горелки.

Остальные размеры горелки рассчитываем по империческим уравнениям.

Диаметр входного отверстия для воздуха:

$$d_2 = (1.5 \dots 2) d_3 = 1.9 \cdot 0.042 = 0.079 \text{ м.}$$

Диаметр выходного сечения горелки:

$$d_{\text{вых}} = (1.05 \dots 1.1) d_3 = 1.05 \cdot 0.042 = 0.044 \text{ м.}$$

Диаметр диффузора:

$$d_4 = (2.0 \dots 2.2) d_3 = 2.2 \cdot 0.042 = 0.092 \text{ м.}$$

Длина конфузора:

$$L_1 = (1.5 \dots 2) d_3 = 2 \cdot 0.042 = 0.084 \text{ м.}$$

Длина смесителя:

$$L_2 = (1.0 \dots 1.5) d_3 = 1.5 \cdot 0.042 = 0.063 \text{ м.}$$

Длина диффузора:

$$L_3 = \frac{d_4 - d_3}{2 \operatorname{tg} \beta / 2} = \frac{0.092 - 0.042}{2 \operatorname{tg} 10 / 2} = 0.32 \text{ м}$$

где  $\beta = 10 - 12.5^\circ$  – угол раскрытия струи.

Длина конфузора:

$$L_4 = d_{\text{вых}} = 0.046 \text{ м}$$

Общая длина горелки:

$$L = \sum_{i=1}^n L_i = L_1 + L_2 + L_3 = 0.084 + 0.063 + 0.046 = 0.52 \text{ м}$$

Скорость, при которой происходит просок пламени в го-

релку:

$$W_n = 7.75 \cdot 10^{-3} \cdot U_n^2 \cdot \frac{d}{a} = 7.75 \cdot 10^{-3} \cdot 0.35^2 \cdot \frac{0.046}{18.5 \cdot 10^{-6}} = 23.6 \text{ м/с}$$

где  $a = 18.5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$  – коэффициент температуропроводности;

$U_n = 0.35 \dots 0.38 \text{ м/с}$  – скорость распространения пламени.

Скорость смеси из горелки:

$$W_{\text{см}} = \frac{V_{\text{см}}}{f_{\text{см}}} = \frac{\alpha \cdot V_0^{\text{B}} \cdot V_0^{\text{Г}} + V_0^{\text{Г}}}{0,785 d_{\text{вых}}^2} = \frac{0,6 \cdot 4,28 \cdot 0,011 + 0,011}{0,785 \cdot 0,044^2} = 25,8 \text{ м/с}$$

В связи с тем, что  $W_{\text{см}} > W_n$  – проскок пламени в горелку не возможен.

#### 4 Расчет подовой горелки

Исходные данные. Рассчитать подовую горелку для котла НР (ч) с поверхностью нагрева  $H = 34 \text{ м}^2$ , переводимого на природный газ. Производительность котла 400 кВт. Размер колосниковой решетки 1592 X 815 мм. Характеристики сжигаемого газа:  $Q^c = 35600 \text{ кДж/м}^3$ ;  $V_0 = 9,5 \text{ м}^3/\text{м}^3$ ;  $\rho_{\text{газ}} = 0,73 \text{ кг/м}^3$ ; КПД котла – 0,85.

Решение 1. Принимаем одну подовую горелку. Расход газа на горелку равен:

$$Q_{\text{гор}} = \frac{3600 \cdot 400}{0,85 \cdot 35600} = 47,5 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

2. Для коллектора горелки выбираем цельнотянутую трубку с наружным диаметром 40 мм и толщиной стенки 4 мм. Скорость газа в трубке составит:

$$W_k = \frac{47,5}{3600 \cdot 0,00081} = 16,3 \text{ м/с}.$$

Площадь живого сечения трубы равна  $0,00081 \text{ м}^2$ .

3. Определим скорость воздуха в узком сечении щели по формуле (1.1), предполагая, что котёл работает без дутья, разряжение в топке составляет 8 Па.

$$W_B = 0,7 \sqrt{\frac{2 \cdot 8}{1,29}} = 2,45 \text{ м/с}; \quad \text{при } \mu_B = 0,7 \text{ и } \rho_B = 1,29 \text{ кг/м}^3.$$

4. Определим ориентировочную длину коллектора по формуле (1.3), принимая  $q_k = 350$  кВт/м:

$$l = \frac{47,5 \cdot 35600}{3600 \cdot 350} = 1,35 \text{ м.}$$

5. Определим ширину щели по формуле (1.2) при коэффициенте избытка воздуха  $\alpha = 1,2$  и  $T_B/273 = 1$ :

$$a = \frac{1,2 \cdot 9,5 \cdot 47,5}{3600 \cdot 2,45 \cdot 1,35} + 0,04 = 0,086 \text{ м.}$$

Принимаем ширину щели 86 мм.

6. Определяем проникание струи в глубь воздушного потока по формуле (1.5):  $h = 0,45 (86 - 40) = 20,5$  мм.

7. Рассчитаем диаметр выходных отверстий по формуле (1.7).

Угол раскрытия принимаем  $90^\circ$  С, тогда угол атаки  $\alpha$  равен  $45^\circ$ ,  $\sin 45^\circ = 0,707$ .

Отношение скоростей принимаем  $W_\Gamma/W_B = 1,1$ , а коэффициент  $\kappa = 1,7$ .

$$d_0 = \frac{1}{1,7} \cdot \frac{1}{11} \cdot \sqrt{\frac{1,29}{0,73}} \cdot \frac{1}{0,707} \cdot 20,5 = 2,05 \text{ мм.}, \quad \text{принимаем } d_0 = 2,1 \text{ мм.}$$

Шаг отверстий  $\delta$  равен:

$$\delta = 0,75 \cdot 20,5 + 3 = 18,4 \text{ мм.}, \quad \text{принимаем } \delta = 19 \text{ мм.}$$

8. Определяем число отверстий в коллекторе. Расход газа через одно отверстие равен:

$$q_\Gamma = \frac{3,14 \cdot 2,1^2}{4 \cdot 10^6} \cdot 27 \cdot 3600 = 0,34 \text{ м}^3/\text{ч.}$$

Здесь скорость газа

$$W_r = 11 \cdot 2,45 = 27 \text{ м/с.}$$

Число отверстий

$$n = \frac{47,5}{0,34} = 140 \text{ шт.}$$

9. Проверим длину коллектора

$$l = \frac{(140+1) \cdot 19}{2} = 1340 \text{ мм.}$$

Эта величина практически не отличается от принятой ранее 1330 мм. Длину щели принимаем  $l_{щ} = 1340 + 30 = 1370$  мм. Этот размер меньше длины колосниковой решётки на  $1592 - 1370 = 222$  мм, что допустимо.

10. Определим необходимое давление газа перед задвижкой горелки по формуле (1.8):

$$H = \left[ \frac{1}{0,65^2} + 2,5 \left( \frac{480}{810} \right)^2 \right] \cdot \frac{27^2}{2} \cdot 0,73 = 870 \text{ Па;}$$

где  $F = 0,785 \cdot 140 \cdot 2,1^2 = 480 \text{ мм}^2$  – суммарная площадь выходных отверстий при  $\mu_0 = 0,65$ ;  $\Sigma \xi = 2,5$ .

## **5 Пример расчета механической центробежной форсунки с круглыми тангенциальными входными каналами**

**Исходные данные.** Распыливаемая жидкость—вода. Параметры: плотность  $\rho_{ж} = 1000 \text{ кг/м}^3$ , коэффициент кинематической вязкости  $\nu_{ж} = 1,006 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ , коэффициент поверхностного натяжения  $\sigma = 73 \cdot 10^{-3} \text{ Н}\cdot\text{м}$ , перепад давления жидкости на форсунке  $\Delta P = 7,85 \cdot 10^5 \text{ Па}$ . Производительность форсунки  $G = 400 \text{ кг/ч} = 0,111 \text{ кг/с}$ . Необходимый центральный корневой угол факела распыла  $\alpha_{к} = 100^\circ$ . Распыливание осуществляется

в неподвижном воздухе с параметрами: температура  $t_b=15^\circ\text{C}$ , плотность  $\rho_b=1,18 \text{ кг/м}^3$ , динамическая вязкость  $\mu_b=17,55 \times 10^{-6} \text{ Н}\cdot\text{с/м}^2$

Определение основных размеров форсунки. На графике (рисунок 3.10) значению  $\alpha_k=100^\circ$  соответствует значение  $A_{\text{эк}}=4$ . По формуле (3.7) определяют коэффициент расхода форсунки:

$$\mu = 0.44A_{\text{эк}}^{-0.65} = 0.44 \cdot 4^{-0.65} = 0.178$$

Используя формулу расхода (3.2), определяют диаметр сопла форсунки:

$$\begin{aligned} d_c &= \sqrt{G / (0.785 \mu \sqrt{2 \rho_{\text{ж}} \cdot \Delta P})} = \sqrt{0.111 / (0.785 \cdot 0.178 \cdot \sqrt{2 \cdot 1000 \cdot 7.85 \cdot 10^5})} = \\ &= 4.5 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 4.5 \text{ мм} \end{aligned}$$

В соответствии с рекомендациями принимают число входных каналов  $z=2$ , значение коэффициента  $\varepsilon_d=0,75$ , значение параметра  $B=4$ . Принимают (с последующим уточнением) число  $Re$  для входных каналов  $Re_{\text{вх}}=39000$  и по формуле (3.12) вычисляют значение коэффициента трения  $\lambda_k$ :

$$\lambda_k = 1.22 / Re_{\text{вх}}^{0.36} = 1.22 / 39000^{0.36} = 0.03$$

Из формулы (3.4) определяют значение геометрической характеристики форсунки  $A$ :

$$A_{\text{эк}} = \frac{A / \varepsilon_d}{1 + \lambda_k \left[ B^2 / (\varepsilon_d \cdot z) - A / \varepsilon_d \right] / 2}; \quad 4 = \frac{A / 0.75}{1 + 0.03 \left[ 4^2 / (0.75 \cdot 2) - A / 0.75 \right] / 2}$$

Отсюда  $A=3.28$ .

Из формулы (3.3) определяют диаметр входных каналов:

$$d_{\text{вх}} = B \cdot d_c / (z \cdot A) = 4 \cdot 4.5 / (2 \cdot 3.28) = 2.75 \text{ мм.}$$

Затем вычисляют число  $Re_{\text{вх}}$ . Скорость воды во входных каналах:

$$W_{\text{вх}} = 4G / (\pi \cdot z \cdot d_{\text{вх}}^2 \cdot \rho_{\text{ж}}) = 4 \cdot 0.111 / (3.14 \cdot 2 \cdot 2.75^2 \cdot 10^{-6} \cdot 1000) = 10.1 \text{ м/с}$$

Тогда:

$$\text{Re}_{\text{вх}} = W_{\text{вх}} \cdot d_{\text{вх}} \cdot \sqrt{z} / \nu_{\text{ж}} = 10.1 \cdot 2.75 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{2} / 1.006 \cdot 10^{-6} = 39000$$

Полученное значение  $\text{Re}_{\text{вх}}$  совпадает с принятым, поэтому уточнения расчета  $d_{\text{вх}}$  не требуется.

Внутренний диаметр камеры закручивания определяют из выражения для параметра В:

$$D_{\text{к.з}} = d_{\text{вх}}(B+1) = 2.75(4+1) = 13,75 \text{ мм.}$$

Остальные размеры распылителя форсунки принимают в соответствии с рекомендациями, приведенными в разд.3.5: длина камеры закручивания  $H_{\text{к.з}} = 1,4d_{\text{вх}} = 1,4 \cdot 2,75 \approx 4$  мм; длина сопла  $l_c = 0,2 d_c = 0,2 \cdot 0,45 = 0,9$  мм; толщина стенки камеры закручивания  $b = 2d_{\text{вх}} = 2 \cdot 2,75 = 5.5$  мм; угол перехода от камеры закручивания к соплу  $\beta = 120^\circ$ .

Определение максимального диаметра капель. Толщину жидкой пелены  $\delta$  определяют по формуле (3.13):

$$\begin{aligned} \delta &= d_c (1 - \sqrt{1 - \mu \cdot \cos(\alpha_k / 2) / 2 \cos(\alpha_k / 2)}) = \\ &= 4.5 (1 - \sqrt{1 - 0.178 \cdot \cos(100/2) / 2 \cos(100/2)}) = 0.245 \text{ мм} \end{aligned}$$

Площадь сечения жидкой пелены по формуле равна:

$$\begin{aligned} f_n &= \pi \cdot \delta [d_c - \delta \cdot \cos(\alpha_k / 2)] = 3.14 \cdot 0.245 \cdot 10^{-3} [4.5 \cdot 10^{-3} - 0.245 \cdot 10^{-3} \cdot \cos(100/2)] = \\ &= 3.34 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \end{aligned}$$

Начальная относительная скорость истечения жидкости из сопла форсунки:

$$u_0 = G / (\rho_{\text{ж}} \cdot f_n) = 0.111 / (1000 \cdot 3.44 \cdot 10^{-6}) = 33.3 \text{ м/с}$$

Максимальный диаметр капель определяют по формуле:

$$d_{\text{макс}} = \delta (67 + 3.44 \cdot 10^{-3} \Pi_2) \Pi_1^{-0.7}$$

$$\text{где } \Pi_1 = u_0 \cdot \delta \cdot \rho_g / \mu_g = 33.3 \cdot 0.245 \cdot 10^{-3} \cdot 1.18 / (17.55 \cdot 10^{-6}) = 548$$

$$P_2 = \delta \cdot \rho_g \cdot \sigma / \mu_g^2 = 0.245 \cdot 10^{-3} \cdot 1.18 \cdot 73 \cdot 10^{-3} / (17.55 \cdot 10^{-6})^2 = 68600$$

Тогда:

$$d_{\max} = 245(67 + 3.44 \cdot 10^{-3} \cdot 68600) \cdot 548^{-0.7} = 860 \text{ мкм.}$$

## **6 Пример расчета вихревой пневматической форсунки высокого давления**

**Исходные данные.** Производительность форсунки по кубовому остатку  $G_{\text{ж}} = 400 \text{ кг/ч} = 0,111 \text{ кг/с}$ , плотность жидкости  $\rho_{\text{ж}} = 1000 \text{ кг/м}^3$ . Параметры распыливающего агента-компрессорного воздуха: температура  $t_1 = 60^\circ\text{C}$ ; избыточное давление  $P_1 = 0,2 \text{ МПа}$ ; удельный объем  $v_1 = 0,317 \text{ м}^3/\text{кг}$ ; плотность  $\rho_1 = 3,16 \text{ кг/м}^3$ . Удельный расход компрессорного воздуха  $g_{\text{к.в}} = 0,15 \text{ кг/кг}$ . Необходимый центральный корневой угол факела распыла  $\alpha_{\text{к}} = 90^\circ$ .

**Параметры компрессорного воздуха на выходе из форсунки.** Критическое отношение давлений для воздуха  $P_2/P_1 = 0,529$ ; следовательно, абсолютное давление воздуха на срезе сопла форсунки составит

$$P_2 = 0,529 P_1 = 0,529(0,2 + 0,101) = 0,159 \text{ МПа.}$$

Температура воздуха на срезе сопла форсунки по формуле равна:  $T_2 = T_1(P_2/P_1)^{(k-1)/k} = (273 + 60)(0.159/0.301)^{(1.4-1)/1.4} = 278 \text{ К}$

Плотность воздуха на срезе сопла форсунки:

$$\rho_2 = \rho_0(273/T_2)(P_2/0.101) = 1.293(273/278)(0.159/0.101) = 2.0 \text{ кг/м}^3$$

**Диаметры сопла форсунки и жидкостной трубки.** Для обеспечения  $\alpha_{\text{к}} = 90^\circ$  по графику на рис. 3.10 определяют  $A_p = 2,8$ . Тогда геометрическая характеристика форсунки определится из соотношения (3.21):

$$A = A_p \cdot \rho_1 / \rho_2 = 2.8 \cdot 3.16 / 2 = 4.42$$

Для  $A_p=2.8$  по графику на рис. 3.10 определяют коэффициент расхода форсунки  $\mu=0.22$  и коэффициент живого сечения сопла  $\varepsilon=0.43$ .

По формуле расхода (3.23) рассчитывают необходимую площадь выходного сечения сопла форсунки:

$$f_c = \frac{g_{к.в} \cdot G_{ж}}{\left( \mu \cdot \sqrt{2 \frac{k}{k+1} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{2/(k-1)} \cdot \frac{P_1}{\rho_1}} \right)} = \frac{0.15 \cdot 0.111}{\left( 0.22 \cdot \sqrt{2 \frac{1.4}{1.4+1} \left( \frac{2}{1.4+1} \right)^{2/(1.4-1)} \cdot \frac{0.301 \cdot 10^6}{0.317}} \right)} =$$

$$= 0.113 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

Диаметр сопла форсунки:

$$d_c = \sqrt{f_c / 0.785} = \sqrt{0.113 \cdot 10^{-3} \cdot 10^6 / 0.785} = 12 \text{ мм}$$

Диаметр воздушного вихря по формуле (3.25) равен:

$$d_e = d_c \sqrt{1-\varepsilon} = 12 \sqrt{1-0.43} = 9.1 \text{ мм}$$

Наружный диаметр жидкостной трубки  $d_{ж.нар}$  принимают менее  $d_v$ . Если принять  $d_{ж.нар} = 9$  мм при толщине стенки 0,5мм, то скорость истечения жидкости из трубки составит:

$$W_{ж} = G_{ж} / (\rho_{ж} 0,785 d_{ж.вн}^2) = 0,111 / (1000 \cdot 0,785 \cdot 8^2 \cdot 10^{-6}) = 2,2 \text{ м/с};$$

такая скорость истечения является приемлемой.

Диаметры входных каналов и камеры закручивания. Принимают число входных каналов  $z=2$  и параметр  $B=(D_{к.з}-d_{вх})/d_{вх}=4$ . Из формулы для геометрической характеристики форсунки (3.3) определяют диаметр входных каналов:  $d_{вх}=Bd_c/(zA)=4 \cdot 12/(2 \cdot 4,42)=5,4$  мм.

Диаметр камеры закручивания:

$$D_{к.з}=d_{вх}(B+1)=5,4(4+1)=27\text{мм}.$$

**Остальные размеры распылителя форсунки.** Длину



входных каналов принимают:  $l_{\text{вх}}=2d_{\text{вх}}=2\cdot 5,4=11$  мм.

Так как  $D_{\text{к.з}}/d_{\text{вх}}$  не превышает 5, то толщину стенки камеры закручивания принимают  $b=l_{\text{вх}}=11$  мм. Тогда наружный диаметр камеры закручивания:

$$D_{\text{к.з.нар}}=D_{\text{к.з}}+2b=27+2\cdot 11=49 \text{ мм.}$$

Высота камеры закручивания:  $H_{\text{к.з}}=1.2d_{\text{вх}}=1.2\cdot 5.4=6.5$  мм

Угол перехода от камеры закручивания к соплу  $\beta$  принимают равным  $120^{\circ}$ . Длина сопла:  $l_{\text{с}}=0.3d_{\text{с}}=0.3\cdot 12\approx 3.5$  мм.

ПРИЛОЖЕНИЕ Г  
СРЕДНИЕ ТЕПЛОЕМКОСТИ ГАЗОВ  $C_{cp}$ , кДж/(м<sup>3</sup>.К)

t, °C	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO	H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	Воздух сухой	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> S	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>
0	1,306	1,294	1,298	1,277	1,599	1,495	1,733	1,549	1,298	1,825	1,507	2,211
100	1,319	1,298	1,302	1,289	1,700	1,507	1,813	1,641	1,302	2,064	1,532	2,495
200	1,336	1,298	1,306	1,298	1,788	1,524	1,888	1,758	1,306	2,282	1,562	2,776
300	1,357	1,306	1,315	1,298	1,863	1,541	1,955	1,888	1,315	2,495	1,595	3,044
400	1,377	1,315	1,327	1,302	1,930	1,566	2,018	2,014	1,327	2,688	1,633	3,308
500	1,398	1,327	1,344	1,306	1,989	1,591	2,060	2,139	1,344	2,864	1,671	3,555
600	1,415	1,340	1,357	1,310	2,043	1,616	2,114	2,261	1,357	3,027	1,780	3,776
700	1,436	1,352	1,373	1,315	2,089	1,641	2,152	2,378	1,369	3,178	1,746	3,986
800	1,449	1,365	1,386	1,319	2,098	1,666	2,181	2,504	1,382	3,308	1,784	4,174
900	1,465	1,377	1,398	1,323	2,169	1,696	2,215	2,600	1,398	3,433	1,817	4,363
1000	1,478	1,390	1,411	1,331	2,202	1,725	2,236	2,700	1,411	3,546	1,851	4,530
1100	1,491	1,403	1,424	1,336	2,236	1,750	2,261	2,788	1,424	3,655	1,884	4,685
1200	1,503	1,415	1,436	1,344	2,265	1,775	2,278	2,264	1,432	3,751	1,909	4,827
1300	1,511	1,424	1,449	1,352	2,290	1,805	2,299	2,889	1,444	-	-	-
1400	1,520	1,436	1,457	1,361	2,315	1,830	2,319	2,960	1,453	-	-	-
1500	1,528	1,444	1,465	1,369	2,336	1,855	2,340	3,044	1,470	-	-	-
1600	1,537	1,453	1,474	1,373	2,374	1,876	2,361	-	1,478	-	-	-
1700	1,545	1,461	1,482	1,382	2,374	1,901	2,382	-	1,486	-	-	-
1800	1,553	1,470	1,491	1,390	2,391	1,922	-	-	1,922	-	-	-
1900	1,562	1,474	1,499	1,398	2,407	1,943	-	-	1,499	-	-	-
2000	1,570	1,482	1,503	1,407	2,424	1,964	-	-	1,507	-	-	-
2100	1,574	1,491	1,511	1,415	2,437	1,985	-	-	1,516	-	-	-
2200	1,583	1,495	1,516	1,424	2,449	2,001	-	-	1,520	-	-	-
2300	1,591	1,503	1,520	1,432	2,462	2,018	-	-	1,524	-	-	-
2400	1,595	1,507	1,528	1,436	2,470	2,035	-	-	1,532	-	-	-
2500	1,604	1,511	1,532	1,444	2,483	2,052	-	-	1,537	-	-	-
2600	1,608	1,520	1,537	1,453	2,520	2,068	-	-	1,545	-	-	-
2700	1,616	1,528	1,545	1,461	2,533	2,085	-	-	1,553	-	-	-
2800	1,624	1,537	1,553	1,465	2,546	2,102	-	-	1,557	-	-	-
2900	1,629	1,545	1,562	1,474	2,558	2,114	-	-	1,566	-	-	-
3000	1,637	1,549	1,570	4,82	2,571	2,127	-	-	1,570	-	-	-

## ПРИЛОЖЕНИЕ Д

### МЕТОДИКА ПО ВЫБОРУ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ, ВИДА ТОПЛИВА, СПОСОБА ЕГО СЖИГАНИЯ, ГАЗОГОРЕЛОЧНЫХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ КОНКРЕТНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Среди важнейших проблем, поставленных наукой и практикой, особое место занимает проблема полного и качественного сжигания органического топлива для обеспечения заданной производительности теплотехнической установки.

Особая роль режима всесторонней экономии в решении экономических задач Украины на период до 2010 года. Конкретно поставлена задача добиться того, чтобы прирост потребностей, в частности, в органическом топливе удовлетворялся бы на 75-80% путем его экономии. Повышение эффективности использования топливо-энергетических ресурсов определяется как дальнейшим развитием, так и радикальным улучшением использования топлива.

Главные направления включают как важнейшие мероприятия по дальнейшему развитию топливно-энергетического комплекса, так и по повышению эффективного использования ресурсов топлива в действующих теплотехнических агрегатах.

Основным источником энергии, используемым человечеством, является органическое топливо, которое составляет более 80% от всех потребляемых энергоресурсов.

В связи с вышеуказанным задача по разработке новой и выбору существующих конструкций теплотехнических установок, выбору вида топлива, способа сжигания и конструкции сожигательных устройств, соблюдения санитарных норм при их экс-

плуатации и другие вопросы являются актуальными и требуют решения.

Итак, после ознакомления с учебником «Спецвопросы сжигания и термической переработки топлива» мы можем сказать, что в промышленности применяется в основном факельный способ сжигания газообразного, жидкого и твердого топлив.

Всякий теплотехнический процесс для осуществления которого необходимо тепло, как правило, связан с процессом сжигания органических топлив.

Для того, чтобы рассмотреть и четко поставить проблемы, связанные с процессом сжигания топлива, необходимо рассмотреть вкратце основные условия сжигания газообразных, жидких и твердых топлив. В общем виде при сжигании органических топлив мы должны руководствоваться следующим:

- обеспечением высокой производительности теплотехнической установки с минимальным удельным расходом топлива;
- качеством сжигания топлива и охраной окружающей среды.

Это основные требования, которые должны предъявляться к топливам. Однако каждое из этих основных требований включает ряд вспомогательных, которые в совокупности определяют главную роль.

Остановимся более подробно на этом. Так например, при сжигании газообразного топлива необходимо выполнить следующие условия: непрерывный подвод топлива и окислителя в зону горения в определенных концентрационных пределах, нагрев до температуры воспламенения, сам процесс горения топлива и отвод продуктов сгорания. Невыполнение одного из этих условий приведет к прекращению процесса горения.

Очень часто читателя в тупик ставит вопрос, как правильно выбрать теплотехническую установку для определенного технологического процесса, вид топлива, способ сжигания и т.д. Поэтому вопрос сжигания топлива не может рассматриваться вне теплотехнической установки и должен быть направлен на осуществление конкретного теплотехнического процесса, а также покажем, как и какие проблемы (задачи) нам необходимо будет решать при этом для обеспечения технологического процесса.

Представим себе, что мы выбрали технологический процесс (нагрев металла под прокатку или термообработку). Нам известен вид топлива или мы его выберем (по  $t_{\text{жар}}$ ). Например: имеется горючий газ определенного химического состава, определенной теплоты сгорания. Для обеспечения течения технологического процесса в теплотехнической установке необходимо решить ряд вопросов. Здесь необходимо отметить, что почти всегда любой теплотехнический расчет начинается с расчета горения топлива, в процессе выполнения которого определяются расход теоретически необходимого и действительного количества воздуха, состав, объем продуктов сгорания, их плотности и температура.

Расход топлива на теплотехнический агрегат (нагревательная печь, колодец и др.) определяется из уравнения теплового баланса:

$$Q_{\text{прих}} = Q_{\text{расхода}}$$

Итак, мы с вами уже определили расход топлива, но перед этим необходимо было бы выбрать вид топлива для отопления конкретной теплотехнической установки. Выбор вида топлива производится, как вам уже об этом неоднократно говорилось, в курсе «Топливо и основы теории горения» по температуре жаропроизводительности с учетом температуры технологического процесса, времени тепловой обработки материалов, обеспечения

высоких технико-экономических показателей теплотехнической установки.

Следующий вопрос, который должен был бы возникнуть у читателя, а как же выбрать способ сжигания данного вида топлива. Из ранее читаемых курсов известно, что в промышленности используется, в основном, факельный способ сжигания газообразного топлива, который в зависимости от места смешивания газа с воздухом можно разделить на три принципа: диффузионный, кинетический и смешанный.

В качестве напоминания рассмотрим кратко характеристику каждого из этих принципов:

- диффузионный принцип сжигания топлива отличается наименьшей интенсивностью горения, наиболее длинным пламенем (для углеводородных газов – светящимся, повышенной величиной химического недожога);
- кинетический принцип сжигания газа характеризуется наивысшей интенсивностью горения, коротким не светящимся пламенем, возможностью сжигания газа с коэффициентом расхода воздуха близким к единице;
- смешанный принцип сжигания по указанным выше характеристикам занимает промежуточное положение между характеристиками кинетического и диффузионного принципов. Особенностью структуры пламени при смешанном принципе сжигания является наличие двух фронтов горения: кинетического (внутреннего) и диффузионного (внешнего).

На каком из способов остановить свой выбор, вы сможете дать ответ только в том случае, если вы будете конкретно рассматривать технологический процесс тепловой обработки материала, конкретную огнетехническую установку и вид теплообме-

на в ней. Следует помнить, что диффузионный принцип применяют в основном в печах с длинным рабочим пространством (нагревательные колодцы, печи для сушки и обжига материалов, мартеновские, водогрейные и паровые котлы и др.).

Для того, чтобы разработанный теплотехнический агрегат имел высокие теплотехнические показатели, необходимо правильно организовать процесс сжигания топлива данным принципом, т.е. если мы рассмотрим калориметрическую температуру, а она является как вы уже знаете, характеристикой организации способа сжигания данного вида топлива, т.е.:

$$t_{\text{кал}} = \frac{Q_{\text{н}}^{\text{р}} + Q_{\text{ф}}^{\text{в}} + Q_{\text{ф}}^{\text{т}}}{V_{\text{п.г}} \cdot c_0^{t_{\text{кал}}}}$$

Итак, в процессе анализа технологического процесса тепловой обработки материала установили, что теплотехническая установка имеет длинное рабочее пространство, т.е. в данном случае мы отдаем предпочтение диффузионному принципу сжигания топлива. Тогда, по справочнику В.Л. Гуссовского «Сожигательные устройства нагревательных и термических печей» выбираем диффузионную горелку по полученному ранее расходу топлива или рассчитываем ее. Следует всегда помнить, что для повышения температуры и коэффициента использования тепла топлива всегда необходимо греть газ, воздух как можно до более высоких температур. Это обеспечит снижение расхода топлива на технологический процесс.

Знаем с вами, что коэффициент расхода воздуха диффузионных горелок типа «труба в трубе» колеблется и составляет  $\alpha=1.15-1.25$ . В связи с этим гораздо целесообразнее в печах с окислительной атмосферой принять  $\alpha=1.1-1.15$ . Это положительно скажется на температуре процесса. Также следует помнить,

что в основе вышеперечисленных принципов сжигания топлива лежит процесс смешивания топлива с окислителем (обычный воздух, воздух, обогащенный кислородом, технически чистый кислород). Поэтому выбранный принцип сжигания топлива, а вместе с ним и диффузионная горелка обладает следующими недостатками:

- низкой объемной плотностью тепловыделения до  $0.6 \text{ Вт/м}^3$ ;
- значительным химическим недожогом,  $q_{\text{х.н}} \geq 0.4\%$ .

В связи с этим конструктор должен выбрать или сконструировать такую горелку, в которой предусматривалась бы закрутка газа и воздуха. Это в значительной степени снизит недожог топлива, а также уменьшит коэффициент расхода воздуха и повысит температуру горения.

Теперь рассмотрим с вами другой вариант, т.е. огнетехническая установка имеет малое рабочее пространство и технология обработки материала требует равномерности распределения температуры в рабочем пространстве ее, т.е. в данном случае мы с вами выбираем кинетический принцип сжигания топлива, для осуществления которого принимаем кинетическую горелку с полным предварительным перемешиванием. Но в этом случае, следует помнить, что размеры кинетических горелок примерно пропорциональны их мощностям, т.е. чем больше мощность, тем больше материалоемкость. Поэтому для создания равномерного температурного поля предусматриваем установку нескольких кинетических горелок, количество которых рассчитываем по следующей формуле:

$$n = \frac{1.1 \cdot M_{\text{max}}}{Q_r}$$



где  $M_{\max}$  – максимальная мощность теплотехнической установки, кВт;

$$Q_{\Gamma} = Q_{\text{н}}^{\text{р}} V_0^{\Gamma} \text{ – тепловая мощность горелки, кВт.}$$

Выбрав кинетическую горелку, попробуем проанализировать ее работу. Если в диффузионных горелках диапазон работы горелок широк и мы с вами должны предусмотреть условия по минимальному недожогу топлива в процессе ее работы, то в кинетических горелках задача усложняется тем, что мы должны, прежде всего обеспечить нормальную работу горелки т.е. работу без проскока и отрыва пламени. Не соблюдение этих требований приведет к тяжелым последствиям (взрыв при отрыве пламени и разрушение конструкции горелки при проскоке пламени внутрь ее).

Вы знаете, что для того чтобы горелка работала нормально, скорость истечения смеси из горелки должна быть больше или равна нормальной скорости распространения фронта пламени:

$$W_{\text{см}} \geq U_{\text{н}}$$

где  $U_{\text{н}}$  – нормальная скорость распространения пламени, м/с.

Известно, что горение газа в ламинарном потоке происходит в тонком слое горючей смеси. Линейная скорость перемещения фронта пламени относительно свежей горючей струи смеси в направлении нормали к поверхности фронта пламени – нормальная скорость распространения пламени ( $U_{\text{н}}$ ). Эта скорость, как и скорость химической реакции, весьма существенно зависит от температуры процесса, но при прочих равных условиях имеет максимальное значение для смесей несколько богатых, чем стехиометрические, что свидетельствует о влиянии на эту скорость концентраций активных веществ, которая оказывается более высокой в богатых смесях.

Продолжим анализ работы кинетических горелок. А.С. Иссерлином предложена формула для определения скорости проскока пламени в горелку:

$$W_{\text{пр}} = 7.75 \cdot 10^{-3} \cdot U_n^2 \cdot \frac{d}{a}$$

где  $d$  – диаметр выходного сечения горелки, м;

$a$  – коэффициент температуропроводности смеси, м/с<sup>2</sup>.

В связи с этим, чтобы горелка работала без проскока должно соблюдаться следующее неравенство:

$$W_{\text{min см}} \geq 1.1 W_{\text{пр}}$$

Соблюдение этих условий, а также проведение специальных мер – охлаждение носика горелки, ограничение температуры подогрева газа и воздуха ( $t_{\text{см}} < t_{\text{воспл}}$ ), подбор выходных сечений и ряд других мероприятий обеспечат защиту от проскока пламени в горелку.

Следует всегда помнить, что наиболее опасным с нашей точки зрения является отрыв пламени от горелки, который характеризуется погасанием факела, и если не принять специальных мер, то это явление может привести к взрыву теплотехнического агрегата, т.е. к его разрушению.

Таким образом, обобщая выше сказанное, констатируем, что отрыв факела от горелки возможен при всех принципах организации сжигания газа. Проскок пламени невозможен при диффузионном принципе, т.е. максимальная производительность всех типов горелок ограничена возможностью отрыва факела, а минимальная производительность горелок предварительного смешения газа с окислителем – возможностью проскока пламени в смеси-тель этих горелок.

Кроме того, устойчивому процессу горения газа способствуют два основных обстоятельства: отрыву факела препятствует

наличие зажигательного кольца на периферии горелки в виде устойчивого плоского фронта пламени; проскоку пламени во внутрь горелки препятствует наличие кольцевой зоны охлаждения вблизи стенок горелки, уменьшающей скорость распространения фронта пламени на периферию горючей смеси.

Следует также не забывать, что область устойчивой работы горелки может быть значительно расширена, если в факеле поместить специальный стабилизатор воспламенения в виде тела плохо обтекаемой формы, при этом в кормовой части такого тела возникает циркуляционная вихревая зона из высокотемпературных продуктов сгорания, обеспечивающих непрерывное поджигание свежей смеси, вытекающей из горелки, или создать условия рециркуляции продуктов сгорания, применением специальных приемов передачи тепла к корню факела (применение туннелей, внезапных расширений и т.д.).

Широкое распространение при отоплении огнетехнических установок получили горелки с частичным предварительным смешиванием, в которых используется смешанный принцип сжигания газообразных топлив.

Итак, мы с вами рассмотрели вопросы, касающиеся выбора вида топлива, теплотехнической установки, выбора способа отопления и т.д. Кроме того, показали, с какими нежелательными явлениями необходимо бороться в процессе сжигания органических топлив.

Изучив курс и хорошо проанализировав его можно поставить проблемные задачи по вопросу сжигания органического топлива. Так, например:

- разработка новых конструкций промышленных печей;
- разработка новых конструкций сожигательных устройств для всех видов топлив;

- разработка новых способов организации процесса сжигания топлива (предварительная переработка углеводородных газов непосредственно в промышленных печах и дожигание продуктов конверсии по ходу технологического процесса:



- создать условия рециркуляции продуктов сгорания.

Методика была бы неполной, если бы мы с вами хотя бы вкратце не рассмотрели новые виды тепловой энергии.

Общепризнанным и перспективным является использование термоядерной энергии в промышленных установках. Исходным материалом для получения термоядерной энергии являются топливные циклы, в которых используются легкие элементы: изотопы водорода, лития, гелия, бора. Топливный цикл, в котором используются два изотопа (дейтерий и тритий), может быть осуществлен при наименьших требованиях к температуре плазмы и времени ее удержания.

В связи с этим необходимо при создании энергетических установок использовать именно этот топливный цикл, так как ресурсы дейтерия, который может быть выделен из воды, практически неисчерпаемы. Воды земли содержат около 46 тыс. Гт дейтерия. Тритий в отличие от дейтерия в природе не встречается, но его можно получить, в термоядерном реакторе в процессе разложения, путем поглощения литием быстрых нейтронов. Более предпочтительно применять дейтерий т.к. организованный на его основе топливный цикл не дает радиоактивных отходов и не загрязняет окружающую среду.

Полное овладение человечеством термоядерным синтезом полностью сняло бы проблему изыскания энергоресурсов.

Можно считать задачу выполненной в том случае, если после изучения учебника у читателя возникли следующие вопросы:

все ли сделано научно-исследовательскими и проектно-конструкторскими, а также технологическими институтами по совершенствованию сожигательных устройств и по разработке новых теплотехнических установок с использованием термоядерных реакций и т.д.

Кроме того, стало возможным, самостоятельно проанализировать любую конструкцию теплотехнической установки, способ ее отопления, а также выявить недостатки и сделать попытку устранить их, путем подачи рационализаторского предложения или заявки на изобретения.

Совершенно очевидно, что основной задачей учебника является постановка коренных (проблемных) вопросов по выбору теплотехнического агрегата для тепловой обработки материала, вида топлива, способа сжигания, типа сожигательных устройств и т.д., обеспечивающих высокую производительность и экономичность технологического процесса, т.е. научить читателя применять теоретические знания в инженерной деятельности.

## ПРИЛОЖЕНИЕ Е

### ОПИСАНИЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ ТОПЛИВОСЖИГАЮЩИХ УСТРОЙСТВ

#### 1 Инжекционные горелки

**Рисунок 1 (а, б, в).** Однопроводные инжекционные горелки с активной газовой струей, т.е. за счет энергии струи газа подсасывается воздух. В данном случае струя газа выполняет роль дутьевого вентилятора. Эти горелки могут автоматически поддерживать необходимое соотношение газ – воздух ( $\frac{V_g}{V_b} = \text{idem}$ ). Для чего необходимо постоянное противодействие (разряжение) в топке. Горелки настраиваются один раз, а затем нормально работают при изменении давления газа в широких пределах. Давление газа должно быть не ниже 0,5 МПа.

**Рисунок 1а.** Инжекционная горелка с туннелем, т.к. без него она не работает стабильно из-за отрыва факела.

**Рисунок 1б.** Приведена горелка «Стальпроекта» с расходом газа от 1 до 250 м<sup>3</sup>/ч. Самая большая длинна смесителя до 2,6 м. Для стабилизации процесса горения применен огнеупорный туннель (отсутствует отрыв факела), а для предотвращения проскока пламени в горелку предусмотрено охлаждение ее носика.

**Рисунок 1в.** Инжекционная горелка со стабилизатором Казанцева. В качестве стабилизации горения применяется пластинчатый стабилизатор (отсутствует отрыв пламени). Отсутствие вентилятора позволяет экономить от 7 до 10 кВт в час электроэнергии на каждом м<sup>3</sup> сжигаемого газа. Другой особенностью этих горелок является их авторегулируемость.

**Рисунок 2.** Горелка местного нагрева с кольцевой щелью. Горелка представляет собой прямоугольную трубу Вентури, работает на низком давлении, малые габариты. Производительность горелки до 1000 м<sup>3</sup>/ч. В процессе горения никогда не наблюдается проскока пламени в горелку, т.к. истечение происходит через узкую кольцевую щель.

**Рисунок 3.** Инжекционная горелка с многоструйной подачей газа. Воздух подается в горелку за счет разряжения создаваемого струей газа, расход которого составляет до 1000 м<sup>3</sup>/ч.

**Рисунок 4.** Однопроводная инжекционная горелка с многосопловым смесителем завода им Лихачева теплотехнической лаборатории. В ней вместо одного смесителя представлен блок смесителей, что позволяет сократить длину смесителя в 5 – 6 раз. Горелка может работать стабильно как с охлаждением носика, так и без него. Для стабилизации процесса горения применен керамический туннель и рассекающий конус. Резко снижается длина смесителя. Минимальное давление газа  $P_{\text{мин}} \geq 4000$  Па. Номинальное давление газа составляет  $P_{\text{ном}} = 0,2 - 0,3$  МПа, расход газа 120 м<sup>3</sup>/ч.

**Рисунок 5.** Двухпроводная дутьевая кинетическая горелка с тангенциальным подводом воздуха. Подвод воздуха улиточный, газ вводится через систему

мелких отверстий, что обеспечивает хорошее смесеобразование газа с воздухом, которые сгорают в очень коротком факеле, длина смесителя составляет 30 – 40 диаметров газо-воздушных отверстий ( $L_{см}=30-40d_{газ}$ ). Эти горелки применяют при низком давлении газа до 5000 Па.

**Рисунок 6.** Горелка инфракрасного излучения, в которой газо-воздушная смесь подается в раздаточную камеру, имеющую отверстия в керамике диаметром 1,3 – 1,7 мм. Скорость газа истекающего из сопла составляет 0,1 – 0,15 м/с при давлении газа 500 – 800 Па, т.е. работает на газе низкого давления. Температура керамической части составляет 500 – 900 °С, плотность тепловыделения  $Q:F=170-200$  кВт/м<sup>2</sup>.

**Рисунок 7.** Панельная беспламенная горелка Гипронефтемаш, в которой инжекционный смеситель подает смесь в смесительную камеру, а затем готовая газоздушная смесь выходит через систему газовыпускных трубок диаметром  $d_{отв}=8-14$  мм, заканчивающихся керамическими туннелями. Количество отверстий находится в пределах от 160 до 545 шт. в зависимости от мощности горелки. Затем на каждую трубку одет керамический туннель. На практике известно 18 типоразмеров горелок. Самый большой размер ее представляет собой квадрат с размерами сторон, равными 1 м. Плотность тепловыделения  $Q:F=0,18-1,2$  МВт/м<sup>2</sup>. Производительность горелок от 4 – 20 м<sup>3</sup>/ч. Работают эти горелки с  $\alpha=1,02$ , при этом химический недожег отсутствует ( $q_{х.н.}=0$ ). Как правило, эти горелки устанавливают на вертикальных стенах топок. Температура поверхности составляет 900 – 1400 °С. Газоздушные трубки (ниппеля) имеют диаметр 2-10 мм в зависимости от производительности горелки. Размер туннеля 50×50 мм. Из этих квадратов получают панельную горелку. Можно полностью закрыть боковые стены топочного агрегата этими панелями и получить радиационный вид теплообмена при сжигании газа, дающего несветящийся факел. Работают на давлении газа  $P_{ном} \geq 0,05$  МПа.

**Рисунок 8.** Конструкция двухпроводной инжекционной горелки с активной воздушной струей. Данная конструкция позволяет обеспечить работу на газе низкого давления, сделав воздушную струю активной. В камере нулевого давления происходит инжектирование газа воздушным потоком. Давление газа  $P=0$ , а воздуха 1200 – 7000 Па. На разрезе А-А показан настроечный узел, с помощью которого настраивают горелку путем регулирования расхода воздуха, в зависимости от состава сжигаемого газа.

**Рисунок 9.** Конструкция радиационной горелки чашечного типа. В горелку подается заранее приготовленная газоздушная смесь. Процесс горения протекает непосредственно вблизи керамической поверхности, которая разогревается и служит источником тепловой обработки материала. Температура колеблется от 600 – 1300 °С в зависимости от сжигаемого газа и материала чашки.

**Рисунок 10.** Конструкция горелки местного скоростного нагрева (для нагрева длинных изделий), в которую подается заранее подготовленная газоздушная смесь.

**Рисунок 11.** Конструкция двухпроводной инжекционной горелки для сжигания природного газа. Данная конструкция позволяет при сжигании природно-

го газа получить светящийся факел. Путем подачи природного газа низкого давления в конфузор горелки с углом раскрытия  $20^\circ$ . Ввод газа производят через цилиндрический коллектор, подключенный к полости диффузора, через отверстия в нем, причем оси этих отверстий наклонены к оси горелки под углом, равным половине угла раскрытия диффузора. Подача газа высокого и низкого давления, обеспечивает получение короткого светящегося факела и увеличивает производительность горелки на 10 – 15 %.

## 2 Диффузионные горелки

**Рисунок 12.** Дутьевая горелка типа «труба в трубе», которая имеет самый длинный факел, приблизительно равный  $L_{\phi}=100 - 200d_{\text{вых}}$ . Горелка двухпроводная, воздух подается по наружной трубе, а газ по внутренней. Работает на любом давлении газа. При сжигании углеводородных топлив получается яркосветящийся факел. Применяют в теплотехнических агрегатах с длинным рабочим пространством, в котором осуществляется радиационный вид теплообмена.

**Рисунок 13.** Горелка типа «труба в трубе» для доменных воздухонагревателей (Каупер), характерной особенностью которой является то, что диаметр газового сопла больше диаметра воздушного сопла. Горелка работает на доменном газе, расход которого  $(30 - 60) \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{ч}$

**Рисунок 14.** Дутьевая горелка типа «труба в трубе» с закрученным потоком воздуха (вихревая). Закручивание потока позволяет сократить длину факела в 1,5 раза.

**Рисунок 15.** Многоструйная вихревая горелка улиточным подводом воздуха. Разбивка струи газа на большое количество струй улучшает смешение газа с воздухом и сокращает длину факела.

**Рисунок 16.** Трубчатая горелка «Мосгазпроекта». Подвод газа осуществляется рассредоточено, т.е. струя газа дробится на большое количество струй, воздух вводится поперек потока газа, что значительно улучшает смесеобразование. Работает на газе низкого давления с коэффициентом расхода воздуха  $\alpha=1,1 - 1,15$ . Горелка двухпроводная, воздух подается вентилятором. По оси горелки расположена труба для ввода запальника или может служить смотровым окном.

**Рисунок 17.** Многоструйная горелка с закруткой воздуха лопаточным завихрителем. Воздух подается вентилятором. Горелка двухпроводная. Дробление основной струи газа на мелкие струи и наличия лопаточного завихрителя способствует лучшему смесеобразованию, сокращает длину факела, работает с  $\alpha=1,15$ .

**Рисунок 18.** Бездутьевая многоструйная однопроводная горелка. Струя газа дробится на мелкие струи на выходе из горелки. Применяется двухступенчатая подача воздуха, причем 50 – 60 % от требуемого количества его на сжигание газа подсасывается непосредственно за счет разрежения создаваемого основным потоком газа. Полученная смесь на выходе из горелки дробится на небольшое количество струй. Остальное количество 40 – 50 % подсасывается за счет энергии газоздушнoй струи. Причем подсосы первичного и вторичного воздуха регулируются.



### 3 Горелки с частичным предварительным смешиванием

**Рисунок 19.** Горелка Мосгазпроекта с единичным факелом. Однопроводная горелка. Подсос первичного воздуха осуществляется за счет энергии струи газа, а вторичный воздух подсасывается за счет энергии струи газозвоздушной смеси. Применяют в водогрейных котлах, работающих на природном газе.

**Рисунок 20.** Запальная горелка Моспроекта. Применяют для розжига горелок.

**Рисунок 21 – 22.** Атмосферная горелка Мосгазпроекта. Горелки однопроводные. Применяют в бытовых аппаратах, работает на газе низкого давления.

### 4 Горелки с незавершенным предварительным смешиванием

**Рисунок 23.** Многоструйная щелевая горелка (однощелевая). Газ дробится на большое количество струй. Дает очень короткий факел, т.к. очень хорошее смесеобразование.

**Рисунок 24.** Вихревая горелка с одиночным соплом для подачи газа. Длина смесителя 4 – 5  $d_f$ . Воздух подается вентилятором.

**Рисунок 25.** Типы газовых наконечников для многоструйных горелок с центральной подачей газа служат для дробления выходящего потока газа (газозвоздушной смеси) на большое количество струй, что улучшает процесс горения, стабилизируя горение его в отношении проскока и отрыва пламени.

**Рисунок 26.** Многоструйная вихревая горелка Мосгазпроекта с центральной подачей газа. Воздух подается вентилятором, в воздушном канале расположен лопаточный завихритель. Газ подается по центральной трубе, заканчивающийся наконечником с большим количеством отверстий. Закрутка струи и разделение газа на большое количество струй способствует улучшению процесса смесеобразования, что снижает длину факела.

**Рисунок 27.** Горелка с периферийной подачей газа с улиточным подводом воздуха. Этот способ способствует улучшенному смесеобразованию. Смесь выходит через наконечник, в котором имеется большое количество отверстий. При горении газа получается очень короткий факел.

**Рисунок 28.** Приведены типы газовых коллекторов, многоструйных горелок с периферийной подачей газа, обеспечивающий равномерное распределение газа по выходным отверстиям.

**Рисунок 29.** Предлагаемая многоструйная горелка с центральной периферийной подачей газа. Горелка с двухступенчатой подачей газа. С центральной подачей подается 70 – 80 % газа. С периферийной подачей 20 – 30 % газа. Воздух подается вентилятором. При сгорании газа получается светящийся короткий факел (при сжигании природного газа), путем перераспределением первичного и вторичного газа, при этом возможно регулировать длину и светимость факела.

## 5 Горелки с регулируемыми характеристиками факела

**Рисунок 30.** Горелка с изменением закручивания воздуха. Горелка двухпроводная. Воздух подается вентилятором. Применен лопаточный завихритель с углом  $60^\circ$ . Длина факела регулируется в 6 раз. Светимость факела при сжигании природного газа не падает при укорачивании факела, а даже увеличивается за счет пиролиза природного газа.

**Рисунок 31.** Горелка с изменением и закручиванием газовой струи. Горелка двухпроводная. Закручивание производится путем ввода и вывода завихрителя из газового наконечника, при этом меняется закрутка газа, которая увеличивается при выводе завихрителя. Регулируя процесс смесеобразования можно управлять длиной и светимостью факела.

**Рисунок 32.** Горелка с двухступенчатым подводом газа. Воздух вводится тангенциально. С помощью шиберов регулируется подача воздуха. Кроме того, воздух, проходя через множество отверстий, разбивается на мелкие струи, которые смешиваются с газом, образовавшаяся смесь выходит через множество сопел. Данная горелка позволяет регулировать длину и светимость факела в широких пределах.

**Рисунок 33.** Горелка с регулируемой длиной и светимостью факела. В данной горелке применяется распределитель, от положения которого зависит как длина, так и светимость факела. Горелка двухпроводная. Наличие шайбы позволяет сохранить расход газа при втягивании золотника во внутрь (т.е. остается постоянным гидродинамическое сопротивление горелки).

**Рисунок 34.** Горелка с двухступенчатым подводом воздуха. Однопроводная горелка с двухулиточной подачей воздуха за счет энергии струи газа. Первичный воздух регулируется шайбой. Регулируя количество первичного воздуха шайбой одновременно регулируется и вторичный воздух, подаваемый за счет энергии струи смеси. Вышесказанное позволяет регулировать длину и светимость факела.

**Рисунок 35.** Прямоточная горелка для сжигания природного газа. Это щелевая горелка. Воздух поступает от вентилятора, проходя по коробу, в котором установлены направляющие листы, попадает в амбразуру, выполненную в виде щели. Газ поступает по вертикальным коллекторам и через расположенные в них в два ряда сопла мелкими струями внедряется в воздушный поток. Причем сопла выполнены двух размеров, что позволяет обеспечить хорошее смешение газа с воздухом. Большие сопла расположены в первом ряду по ходу воздуха, а мелкие во втором. Скорость смеси колеблется от 20 до 50 м/с в зависимости от производительности горелки.

**Рисунок 36.** Горелка ТКЗ для доменного газа. Газ и воздух поступает с противоположных сторон приемного двухстороннего коллектора, причем подачу газа регулируют вентилями, а воздух – поворотным шибером. Из горелки воздух вытекает через щели плоскими потоками с обеих сторон газового сопла, что улучшает смесеобразование. Скорость газа и воздуха на выходе из сопла щели горелки составляет 20 – 30 м/с. Производительность горелки по доменному газу 1200 – 15000 м<sup>3</sup>/ч.

**Рисунок 37.** Горелка с регулируемой длиной и светимостью факела. Насадок горелки выполнен в виде входного и выходного дисков, установленных с образованием полости, подключенной к источнику охлаждающего воздуха посредством трубы, раздающие каналы насадка размещены кольцевыми рядами и наклонены под углом  $10 - 15^\circ$  к оси горелки, а в выходном диске насадка выполнен периферийный кольцевой ряд аксиальных отверстий, причем выходной участок конуса снабжен водоохлаждаемой рубашкой, а на трубе в зоне сопряжения цилиндрического и конфузорного участков корпуса размещен лопаточный завихритель.

## 6 Пылеугольные горелки

**Рисунок 38.** Пылеугольная вихревая двухулиточная горелка. В горелке пылевоздушной смеси и вторичному воздуху сообщается закрученное движение с одинаковым направлением вращения. В топочной камере эти потоки распространяются в виде двух концентрически расположенных усеченных полых конусов, причем внутри конус пылевоздушной смеси, имеющей большой угол раскрытия, чем достигается лучшее перемешивание. Создаваемое разрежение по оси конусов способствует рециркуляции продуктов сгорания к корню факела с его внутренней стороны. Это обеспечивает зажигание факела как по внешней, так и по внутренней поверхностям, что увеличивает как удельный периметр воспламенения, так и устойчивость горения. При внутренней рециркуляции продуктов сгорания в связи с их изоляцией от экранных поверхностей, они не охлаждаются, а их непосредственное соприкосновение с пылевоздушной смесью создает условия стабилизации факела. Амбразуру вихревых горелок выполняют конической.

**Рисунок 39.** Пылеугольная, вихревая, улиточно-лопаточная, двухпоточная горелка. Закрутка потока вторичного воздуха осуществляется осевыми лопаточными аппаратами, а пылевоздушной смеси – улиточными закручивателями. Для зажигания пылевоздушной смеси в горелку монтируется форсунка производительностью до 2 т/ч, тепловая мощность которых составляет не менее 30 % мощности пылеугольной горелки. Кроме того, для розжига пылеугольной горелки предусмотрен дистанционный электрогазовый запальник. Допускается снижение производительности до 60 %, что обеспечивает скорость пылевоздушной смеси выше скоростей, при которых возможна сепарация пыли.

**Рисунок 40.** Прямоточно-улиточная горелка. В ней пылеугольная смесь подается по центральной цилиндрической трубе. На выходе из нее пылевоздушный поток, омывая конечный рассекатель, раскрывается. Вторичный воздух поступает через улиточный закручиватель, создает завихрение факела. Угол раскрытия рассекателя рекомендуется изменять в пределах  $90 - 120^\circ$ . Основным преимуществом этих горелок являются меньшее аэродинамическое сопротивление тракта первичного воздуха. Возможно снижение производительности однопоточных горелок по вторичному воздуху до 70 % без нарушения процесса подачи пылевоздушной смеси.

## 7 Комбинированные горелки

**Рисунок 41.** Схемы комбинированных горелок в зависимости от вида топлива (газوماзутная, пылегазовая и др).

**Рисунок 42.** Газомазутная горелка ЦКТИ. Подаваемый в нее воздух делится на два потока устанавливаемой в коробке разделительной перегородкой и коаксиальным патрубком. С помощью шиберов можно регулировать степень закрутки потока воздуха, в цилиндрическом регистре осевого типа, что обеспечивает при сжигании жидкого топлива и на пониженных нагрузках горелки сохранять на периферии амбразуры заданные скорости воздуха. Лопатки регистра установлены так, что со стороны входа воздуха имеют прямой участок и участок повернутый по радиусу под углом  $40 - 50^\circ$  на стороне выхода воздуха. Газ в горелку подается через кольцевой коллектор и из отверстий его поступает по периферии в воздушный поток. Газовоздушная смеси из амбразуры биконической формы, раскрывающейся под углом  $20 - 25^\circ$  поступает в топочную камеру. Наличие пережима в амбразуре препятствует обратному течению продуктов сгорания и защищает распределительную камеру от нагрева. Эти горелки работают на природном газе с теплотой сгорания  $35,6$  МДж/кг. Производительность от  $0,075$  до  $1,8$  м<sup>3</sup>/с ( $270 - 6480$  м<sup>3</sup>/ч) при давлении  $0,101$  МПа и при температуре равной нулю или на мазуте с расходом от  $0,07$  до  $1,66$  кг/с ( $250 - 6000$  кг/ч). Скорость воздуха в пережиме для горелок с производительностью  $0,07$  кг/с, работающих на мазуте, рекомендуется в пределах  $25 - 35$  м/с, а для производительности  $1,66$  кг/с -  $35-50$  м/с. Требуемый напор воздуха перед горелкой соответственно составляет  $0,64-1,26$  и  $1,26-2,58$  кПа.

**Рисунок 43.** Газомазутная горелка ТКЗ выполнена с тангенциальным регистром и центральной раздачей газа. Поток воздуха закручивается и направляется в амбразуру. Газ подается через кольцевой канал, образованный с помощью двух соосно установленных труб, и через радиально расположенные отверстия в несколько рядов у конца канала, вводится из центральной части горелки в воздушный поток. При включении подачи мазута форсунка автоматически выдвигается в амбразуру. Напор горелок БКЗ той же производительности на  $10 - 15$  % больше чем у горелок ЦКТИ. Конструкция горелки предусматривает установку рабочей мазутной форсунки и запального устройства ЗЗУ – 4 с дистанционным управлением. Растопочная форсунка, производительностью  $30$  % от рабочей, устанавливается и зажигается тем же запальным устройством. Однопоточные горелки с форсунками механического распыливания имеет пределы регулирования от  $100$  до  $70$  %, а двухпоточная от  $100$  до  $50$  %.

**Рисунок 44.** Плоскофакельная горелка ЦКТИ – ТКЗ – ВоГРЭС состоит из двух труб вторичного воздуха направленных под углом  $60^\circ$ . Между ними симметрично относительно горелки расположены две трубы для подачи первичного воздуха с угольной пылью, направленных под углом  $40^\circ$ . Точка пересечения осей труб вторичного воздуха удалена на расстоянии  $2,2 D_2$ , где  $D_2$  – диаметр трубы вторичного воздуха. По оси сопел вторичного воздуха расположены газовые наконечники, а по оси горелки установлена плоскопламенная механическая форсунка. На парогенераторах производительностью  $64$  кг/с ( $230$  т/ч) горелки располагаются встречно, на боковых стенах, а на парогенераторах боль-

шой производительности на фронтальной и задней стенах. Использование соударения струй позволяет регулировать положение факела на высоте топочной камеры, изменяя количественное соотношение вторичного воздуха через верхние и нижние трубы. Горелка применяется при сжигании твердых топлив как с малым, так и с большим выходом летучих, а также для мазута и природного газа. Скорость пылевидного топлива находится в пределах 25 – 30 м/с, вторичного 40 – 50 м/с. Плоскофакельные горелки выполняют производительностью по АШ до 3 кг/с (10 т/ч).

## 8 Механические форсунки

**Рисунок 45.** Простейшая центробежная форсунка с круглыми выходными каналами. Жидкость подается тангенциально в камеру закручивания. Давления мазута от 4 – 4,5 МПа, имеет узкие пределы регулирования производительности. Диапазон качественного регулирования составляет 50 %. Производительность 80 – 2000 кг/ч. Длина факела находится в пределах 1 – 6 м, корневой угол – 50 – 120°.

**Рисунок 46.** Прямоструйная вихревая форсунка. Процесс завихрения осуществляется с помощью завихрителя. Возможно регулирование производительности путем ввода и вывода завихрителя, установленного внутри форсунки. Процесс смесеобразования происходит в топочном пространстве, давление мазута до 1,0 МПа, длина факела 2,5 – 6,0 м, корневой угол – 30-50°.

**Рисунок 47.** Механическая форсунка с рециркуляцией. Мазут подается через центральный ствол, проходит распределительную и распыливающую шайбы и через отверстия наконечника поступает в топку. Из камеры завихрения часть мазута через кольцевой канал возвращается в приемный трубопровод топливного насоса с давлением от 4 до 5 МПа. Изменение давления в сливной линии изменяет расход возвращаемого мазута и тем самым регулирует производительность форсунки. При уменьшении давления из-за увеличения рециркулируемой части мазута производительность форсунки падает, а с увеличением давления увеличивается.

**Рисунок 48.** Центробежная форсунка ВТИ, ЦКТИ и завода «Ильмарине» с распределительным диском. Позволяет регулировать производительность в пределах 60 – 100 %. Наличие распределительного диска улучшает процесс распыливания и смесеобразования топлива с воздухом. Производительность от 80 до 1500 кг/ч, длина факела 1 – 3 м, корневой угол 80 – 120 °.

**Рисунок 49.** Центробежная форсунка БПК с регулируемым сечением входных каналов. Наличие поршня позволяет, путем ввода или вывода его в камеру закручивания, регулировать количество сжигаемого жидкого топлива. Регулирование производительности в пределах 50 – 100 %, длина факела 1,5 – 3 м, корневой угол 100-120°

**Рисунок 50.** Центробежная форсунка позволяет поддерживать качественное распыливание благодаря: наличию отверстий для отвода топлива, вводу жидкого топлива в камеру закручивания тангенциально, раздроблению топлива на мелкие струи перед вводом их в камеру закручивания. Качественное регули-

рование производительности в пределах 60 – 100 %. Корневой угол распыливания 80 – 100 °, длина факела 2 – 2,5 м.

**Рисунок 51.** Двухконтурная (двухступенчатая) центробежная форсунка. Подача жидкого топлива осуществляется двумя путями: первый – путем подачи жидкого топлива в камеру закручивания через распределительный диск, в котором имеется множество мелких отверстий (периферийный); второй – центральный. Возможно регулировать качество распыливания жидкого топлива в зависимости от вязкости жидкости. Пределы регулирования производительности 50 – 100 %, расход топлива 80 – 1000 кг/ч, давление топлива около 5 МПа, корневой угол факела 60 – 100°, длина факела 1 – 2 м.

**Рисунок 52 - 53.** Приведены схемы форсунок с запрессованным и съёмным шнеком для распыливания маловязких жидкостей.

### 9 Пневматические форсунки высокого давления

**Рисунок 54.** Прямоструйная форсунка в которую подается пар по центральной трубе с давлением 0,8 – 1 МПа, по внешней трубе мазут с давлением 0,2 – 0,5 МПа. Наличие сопла Лавалья позволяет получить большие скорости истечения пара, и как следствие, качественное распыление мазута. Для сокращения длины факела применяются насадки. Расход мазута 50 – 2000 кг/ч, длина факела 1,2 – 3 м, корневой угол факела 15 – 30 °.

**Рисунок 55.** Прямоструйная форсунка Шухова, в которой подача мазута производится по центральной трубе, а пар вводится по внешней трубе, встречаясь между собой под углом 45 – 60°. Данная конструкция позволяет регулировать производительность форсунки путем дросселирования с помощью игольчатого клапана. Давление пара 0,7 – 0,9 МПа с температурой 200 – 250°C. С удельным расходом 1,0 кг пара на кг мазута, длина факела 2,5-8м, корневой угол факела 15 – 30 °, производительность 50-2000 кг/ч.

**Рисунок 56.** Двухступенчатая прямоструйная форсунка завода "Серп и Молот". Эта форсунка позволяет получить тонкое распыление благодаря двухступенчатому распыливаю паром и газом. По центральной трубе подается мазут, газ и пар, которые вводят отдельно. Распылитель вводится под углом 45 градусов. В качестве газа может быть применен как природный газ, так и смесь его с коксовальным с теплотой сгорания смеси 28,0 МДж/м<sup>3</sup>. Минимальное давление газа (смеси перед форсункой) 5 кПа, давление пара 0.8 - 1.0 МПа, расход мазута 50-2000 кг/ч, длина факела 1.2 - 4.0 м, корневой угол распыливания 15-30 °.

**Рисунок 57.** Вихревая форсунка А.И. Карабина, в которой по центральной трубе подается мазут с давлением до 0.1 МПа, давление воздуха 0.2 - 0.3 МПа. Форсунка обеспечивает качественное распыливание мазута, хорошее смесеобразование. Расход мазута 50-1000 кг/ч, длина факела 1.0 - 2.5 м, корневой угол распыливания 30-90 °.

**Рисунок 58.** Щелевая форсунка, в которой мазут и распылитель соприкасаются друг с другом на выходе из нее. Выход форсунки выполнен в форме щели, причем распылитель выходит из нижней, а мазут из верхней щели, что обеспечивает качественное распыливание и хорошее смесеобразование, факел

по форме плоский и длиной до одного метра. Применяют в коротких рабочих пространствах, имеющих форму щели.

**Рисунок 59.** Форсунка ДМетИ (Н.Н. Доброходова и И.Г. Казанцева) применяется для отопления крупных мартеновских печей. Эта форсунка высокого давления, в которой по центральной трубе поступает мазут, а распылитель перед встречей с мазутом проходит через сопло Лавалья, плавное расширение которого обеспечивается конусностью мазутного наконечника. Наличие сопла Лавалья позволяет получать высокие скорости истечения распылителя (750 м/с и выше), что обеспечивает хорошее распыливание мазута. Форсунка имеет следующие достоинства: простота конструкции, чистка без разборки, легкость подбора отверстий на заданную производительность, хорошие динамические характеристики факела, хорошее распыливание.

**Рисунок 60.** Форсунка УПИ (конструкции Н.И. Кокарева) применяется для отопления больших мартеновских печей. Эта форсунка высокого давления, в которой распылитель подводится по внутренней трубе, оканчивающейся соплом Лавалья. Мазут поступает по наружной трубе и проникает в распылитель через специальные отверстия, имеющиеся в конце сопла Лавалья. Наличие малых отверстий в форсунке является ее недостатком т.к. предъявляются особые требования к чистоте мазута и в случае засорения их необходима разборка ее для чистки отверстий.

Форсунки ДМетИ и УПИ имеют плавно расширяющиеся смесители и оканчиваются направляющими цилиндрическими наконечниками. Для их хорошей работы рекомендуется применять следующие параметры распылителей: давление пара не ниже 1 МПа с температурой 300 - 350 °С и давление воздуха 0,6 - 0,7 МПа с температурой 250 - 300 °С, производительность форсунок составляет 0,55 – 0,85 кг/с, корневой угол 15 – 30°, длина факела 10 – 15 м.

**Рисунок 61.** Мазутная форсунка парового распыливания конструктивно может быть короткофакельная (с насадком) и длиннофакельная (без насадка). Мазут поступает под небольшим давлением 0,2 – 0,5 МПа. Канал форсунки выполнен прямоточным, с большим сечением, что исключает его засорение. Производительность их колеблется в широких пределах от нескольких килограммов до нескольких тонн (20 – 2000 кг/ч). Длина факела короткофакельной форсунки 1,0 – 2 м, корневой угол 30-90°, а для длиннофакельной форсунки 2,5 – 8,0 м, с корневым углом 15-30°. Эти форсунки могут применяться в парогенераторах любой производительности.

**Рисунок 62.** Ротационная головка ротационной форсунки, в которой мазут подают под давлением 0,12 – 0,13 МПа через полый вал и ряд отверстий в распределителе на распыливающую чашу, которая жестко соединена с валом. При вращении вала со скоростью 600 – 700 об/мин с края чаши стекает непрерывная пленка жидкого топлива. Воздух, нагнетаемый компрессором, находящимся на том же валу, с большой скоростью проходит через кольцевой зазор между вращающейся чашей и неподвижным корпусом. Под влиянием трения о стенки распыливающей чаши и центробежных сил частицы жидкого топлива двигаются по спиральным траекториям. На выходе из чаши движение их будет с большой скоростью по касательной к прежней траектории (отсутствие трения о ча-

шу и действия на них центробежных сил). Форсунка имеет широкий диапазон регулирования производительности от 20 до 100%, расход мазута от 5 до 200 кг/ч, длина факела 0,5 – 3,0 м, корневой угол распыливания от 30 до 170°.

### 10 Пневматические форсунки низкого давления (вентиляторные)

**Рисунок 63.** Нерегулируемые прямоструйные форсунки низкого давления. Форсунка Роквелла представляет собой прямоточную вентиляторную форсунку, в которую подается воздух в количестве 11 – 13 м<sup>3</sup> на 1 кг мазута. Форсунка Грум – Гржимайло, в которую подается первичный воздух в количестве 8 – 10 м<sup>3</sup> (первичный воздух) на 1 кг мазута, остальное количество воздуха необходимое для полного сгорания единицы топлива (вторичный воздух) поступает путем присоса, создаваемого выходящей топливо-воздушной струей. Расход мазута от 5 до 700 кг/ч, длина факела 1,5 – 4,0 м, корневой угол 20 – 30°.

**Рисунок 64.** Форсунки Оргэнергонефти. Первая (а) представляет прямоточную форсунку с двойным распыливанием паром и вентиляторным воздухом имеет широкие пределы регулирования от 10 до 100 %. Расход мазута от 5 до 700 кг/ч, длина факела до 4 м, корневой угол – 30°. Мазут может подаваться под низким давлением. Вторая (б) вихревая форсунка, в которой предусмотрена подпирающая шайба и завихритель, обеспечивающие хорошее завихрение и смесеобразование при двойном распыливании (пар + воздух). Расход мазута от 5 до 700 кг/ч, длина факела – 0,5 – 1,0 м, корневой угол – 60 - 90°.

**Рисунок 65.** Форсунка внутреннего двойного распыла. В конструкции этой форсунки предусмотрена подача первичного и вторичного воздуха, изменяя один из них, путем вращения муфты, приводит к изменению соотношения воздуха на первичное и вторичное распыливание. Регулирование вторичного воздуха от 0 до 30 % от необходимого для полного сжигания мазута. Производительность по мазуту от 5 до 700 кг/ч, длина факела 0,5 – 1,0 м, корневой угол – 20 – 30°.

**Рисунок 66.** Форсунка Стальпроекта с регулируемым проходным сечением для воздуха, позволяет регулировать положение сопла с помощью эксцентрика и изменять качество распыливания, путем изменения проходного сечения для воздуха. Возможна регулировка подачи мазута с помощью иглы. Расход мазута от 5 до 700 кг/ч, длина факела 1,5-2,5 м, корневой угол 20-50°.

**Рисунок 67.** Схема вентиляторной форсунки диффузорного типа с многоструйной подачей топлива. Топливо подается по центральной трубе и выходит из нее через систему большого количества мелких отверстий. Данная форсунка не может работать на малых расходах. Длина факела 2,0 – 4,0 м, корневой угол факела равен углу раскрытия диффузора.

**Рисунок 68.** Схема вентиляторной форсунки с многоструйной центральной подачей топлива и аксиально-тангенциальным завихрителем. Воздух на распыливание мазута подается аксиально-тангенциальным завихрителем под углом 45° к оси форсунки. Дробление струи на много струй осуществляется с помощью отверстий в центральной трубе по ее периметру. Данная форсунка не может работать на малых расходах топлива, длина факела 0,5 – 1,0 м, угол раскрытия факела 60 – 90°.



**Рисунок 69.** Вихревая форсунка Карабина с регулируемыми проходными сечениями для топлива и воздуха. Возможна регулировка как воздуха, так и топлива. Выходное сопло для топлива имеет 6 тангенциально расположенных отверстий. Расход мазута от 5 до 700 кг/ч, длина факела 0,5 – 1,0 м, корневой угол 80 – 110°, расход воздуха может регулироваться до 25 % от необходимого количества на сжигание единицы топлива.

### 11 Комбинированные форсунки

**Рисунок 70.** Пневматическая (паромеханическая) форсунка ЦКТИ в которой совмещены два принципа распыливания: за счет давления мазута и с помощью пара. Она имеет широкий диапазон регулирования производительности от 10 до 100%. Давления мазута 0,4- 0,5 МПа, давление пара 0,8 – 1,0 МПа, длина факела 1,0 - 1,5 м, корневой угол 60 – 110 °.

**Рисунок 71.** Паровоздушная форсунка, в которой производится регулирование расхода воздуха и пара. Расход мазута от 5 до 1000 кг/ч, длина факела 0,8 - 1,0 м, корневой угол 80 – 120°, давление пара не менее 0,8 МПа, мазута не менее 0,4 МПа.

**Рисунок 72.** Воздушно-механическая форсунка обеспечивает двойной распыл: механический за счет давления топлива 0,4 - 0,5 МПа, и за счет воздуха, давление 0,02 – 0,1 МПа. Малый диапазон регулирования производительности -60 – 100 %, длина факела 1,0 - 1,5 м, корневой угол 20 – 40°.

**Рисунок 73.** Паромеханическая форсунка с U – образными распыливающими каналами. Форсунка многосопловая имеет 30 сопел, давление топлива 1,0 – 1,4 МПа, пара 1,0 – 1,6 МПа, удельный расход распылителя  $g_{\text{п}}=0,065$  кг/кг·топлива, корневой угол - 90°, производительность 1,5 т/ч, длина факела 2,25 м.

**Рисунок 74.** Вихревая пневматическая (паровая) форсунка высокого давления. В ней применен тангенциальный ввод распылителя (пара) с давлением более 0,3 МПа, давление жидкости 0,02 – 0,03 МПа, расход мазута от 2 до 700 кг/ч, длина факела 0,5 – 1,5 м, корневой угол 90 – 100 °.

**Рисунок 75.** Паромеханическая форсунка. Двухканальная: один канал для подачи мазута, другой – пара. Может работать как чисто механическая при этом мазут, подаваемый по центральному каналу, последовательно проходит через механический завихритель и насадку. При малой нагрузке, при которой механическое распыливание не обеспечивает требуемого качества, используется пар, который через паровой канал проходит систему отверстий в корпусе форсунки и поступает в паровой завихритель, далее, встречаясь с потоком мазута, распыливает его на выходе из насадки. Диапазон регулирования этой форсунки 20 – 100 %, расход топлива от 50 до 2000 кг/ч, длина факела до 2,5 м, корневой угол – 80 – 110°.

## 12 Радиационные трубы

Для отопления термических печей, работающих с контролируемой атмосферой, применяют радиационные трубы, которые обеспечивают муфелирование и равномерный теплообмен в рабочем пространстве печи.

В настоящее время применяют следующие трубы:

- тупиковые радиационные трубы типа ТРТ, предназначенные для горизонтальной установки в печах с рабочей атмосферой до 900<sup>0</sup>С
- тупиковые радиационные трубы типа ТРР с рециркуляцией продуктов сгорания. Возможна горизонтальная и вертикальная установка их в печах, работающих с рабочей атмосферой до 950<sup>0</sup>С.
- U-образные радиационные трубы с горелками ВНИИМТа- Стальпроекта

**Рисунок 76.** Тупиковая радиационная труба типа ТРТ, состоит из корпуса, выполненного из жаропрочной смеси (излучающая труба), внутри которой размещены горелка, рекуператор и камера сгорания (жаровая труба).

Труба работает следующим образом. Воздух подогревается в трехоборотном рекуператоре, встроенном в излучающую трубу. Природный газ подают через центральную газовую трубу, оканчивающей горелкой. Часть горячего воздуха подсасывается к газовому соплу через отверстие в горелочном патрубке, а остальной воздух подается к выходному сечению горелки. Образовавшаяся газоздушная смесь сгорает внутри жаровой трубы и поступает к излучающей трубе частично через цилиндрические отверстия с боковой стенки жаровой трубы и частично через торцевое отверстие в этой трубе.

Отходящие дымовые газы разделяются на два потока: один направляется в рекуператор, а другой, смешиваясь, со свежей порцией сгоревших газов, поступает обратно в жаровую трубу. Такая рециркуляция обеспечивает равномерное распределение температуры по длине жаровой трубы, снижая ее у корня факела и повышая к торцу радиационной трубы из-за увеличения объема продуктов сгорания. Отсутствует сажевыделение при любых пределах регулирования и минимальном избытке воздуха.

**Рисунок 77.** Тупиковые радиационные трубы типа ТРР разработаны институтом «ВНИИпромгаз» и предназначены для сжигания газа. Работа радиационной трубы осуществляется следующим образом. Поступающий природный газ смешивается у входа в радиационную трубу с первичным воздухом из расчета коэффициента расхода воздуха 0,1-0,2. Истечение первичной газоздушной смеси происходит в сужающей части горелки на расстоянии 30мм от выходного сечения. Вторичный воздух, необходимый для полного сжигания газа, подается к воздушному коллектору, оканчивающемуся воздушным соплом. ТРР имеет два воздушных инжекционных сопла с четырьмя отверстиями, одно из них с большими отверстиями, другое с малыми. Воздух, истекающий из отверстия сопла, инжектирует часть продуктов сгорания, нагреваясь в рекуператоре до 500-600<sup>0</sup>С и постепенно перемешивается с центральной струей газоздушной смеси, образуя растянутый факел внутри жаровой трубы. Продукты сгорания поступают через кольцевой зазор между жаровой и излу-

чающей трубой с температурой 300-500 С. Затем часть из них возвращается с воздухом в камеру горения, остальная часть удаляется через дымоход.

Давление воздуха перед соплом 3,0-3,5 кПа. Для розжига трубы имеется специальное устройство, передвижной стакан, с помощью которого перекрываются окна для инъекции.

**Рисунок 78.** U-образные радиационные трубы с горелкой ВНИИМТ – Стальпроект нормализованы Стальпроект и предназначены для сжигания природного газа. Труба состоит из корпуса, горелки и воздушного рекуператора.

Работа U-образной радиационной трубы, оборудованной горелкой ВНИИМТ – Стальпроект с частичным предварительным смешиванием, в которой газ поступает в трубу через газовое сопло, расположенное по оси корпуса внутри смесительной трубы. В смесительной трубе на участке, близком к выходному сечению сопла, выполнены отверстия, через которые истекающей из сопла газ инжектирует воздух в количестве соответствующем

$\alpha = 0.4 \div 0.5$ . Смесь газа и первичного воздуха, пройдя смесительную трубу, поступает в горелочную ветвь радиационной трубы. Вторичный воздух проходит в зазоре между корпусом и смесительной трубой и входит в рабочее пространство трубы через циркульные отверстия по наружной поверхности наконечника-стабилизатора. Кроме того, часть воздуха поступает через кольцевую щель между образующей стабилизатора и внутренней поверхностью корпуса. Суммарная  $\alpha = 1.05 \div 1.1$ . Температура трубы 800 – 850<sup>0</sup>С, температура дымовых газов перед рекуператором 1070-1100<sup>0</sup>С, нагрев воздуха до 320<sup>0</sup>С. Температура дымовых газов после рекуператора 650<sup>0</sup>С.

**Рисунок 79.** U-образные радиационные трубы типа ТРУ, разработанные институтом «ВНИИ промгаз», отличаются тем, что смесь газа с первичным воздухом подается в зазор между воздушной трубой и корпусом радиационной трубы, а основное количество воздуха подается по центральной воздушной трубе. Постепенное горение газа на поверхности разогретой трубы, обеспечивает устойчивое горение и равномерный теплообмен. Трубы предназначены для сжигания природного газа с рабочей температурой до 1000<sup>0</sup>С. В этих трубах применён регулятор новой конструкции, в котором истечение воздуха из внутренней трубы происходит через большое количество отверстий, а струйный теплообмен при поперечном обтекании воздухом стенки дымового канала увеличивает коэффициент теплоотдачи и повышает температуру воздуха. Зажигание газа в радиационной трубе осуществляется переносным газовым запальником, вставляемым по центру трубы через отверстие для горелки.

**Рисунок 80.** W-образная радиационная труба разработана Стальпроект и устанавливается в вертикальных протяжных печах. Труба работает с разрежением, создаваемым дымососом с помощью которого осуществляется поступление воздуха идущего на сжигание газа. Особенностью трубы является наличие рекуператора, вынесенного из пределов футеровки рабочего пространства и постоянно установлена дежурная горелка. Горелка может работать как на природном, так и на смешанном газе. В зависимости от теплоты сгорания газа и требуемой мощности (производительности) горелки, меняется диаметр сопла.

### 13 Газомазутные горелки

В теплотехнических установках газомазутные горелки применяют в тех случаях, когда при газовом отоплении необходимо иметь резервное топливо - мазут. Совместные сжигания газа и мазута не практикуется. Очень часто для отопления теплотехнических агрегатов применяют в основном сочетание газовой горелки типа «труба в трубе» и форсунки высокого давления типа ФВД или ФК.

**Рисунок 81.** Наиболее простым конструктивным решением являются размещение форсунки в газовом сопле горелки типа «труба в трубе». Такая конструкция позволяет быстро перевести отопление с газа на мазут и наоборот. Обычно в качестве газовой горелки используют дутьевые горелки типа ДВБ, ДНБ, ДВС. При этом диаметр газового сопла горелки увеличивают с тем, чтобы сохранить расчетное значение, а конструкцию колена меняют для крепления на нем фланца форсунки. При такой конструкции газомазутной горелки форсунку нельзя вынимать из газового сопла, т.к. изменится проходное сечение для газа. Однако, постоянное нахождение форсунки в горелке при работе на газу требуют регулярного ухода за форсункой для поддержания её в рабочем состоянии. Её необходимо постоянно продувать распылителем для удаления мазута, протекающего через неплотную запорную арматуру, а после работы на мазуте из форсунки необходимо удалить остатки мазута, иначе при работе на газу носик закоксуется и её дальнейшая эксплуатация будет невозможна без чистки.

**Рисунок 82.** Для устранения недостатка, присущих газомазутным горелкам, форсунку высокого давления размещают в специальной трубе, проходящей по центру газового сопла. В этом случае, газовый и мазутный узлы горелки независимы и при работе на газу, форсунку можно вынимать из горелки, а при переходе на мазут вставлять обратно. Недостатком такого размещения форсунки является значительное увеличение поперечных размеров горелки. Газомазутные горелки были разработаны Стальпроектом для нагревательных печей завода «Серп и молот». Горелки предназначены для сжигания холодной смеси природного и коксового газа с теплотой сгорания  $28 \text{ МДж/м}^3$ . Разработано три типа размера горелок с номинальной производительностью 0,11, 0,17 и 0,28  $\text{м}^3/\text{с}$  при давлении газа перед горелкой 5кПа. В эти горелки вставляют форсунки высокого давления типа ФВД. Каждая горелка выполнена в двух вариантах с различным выходным сечением для воздуха, которое изменяют с помощью насадок. Выбор горелок можно произвести по графикам [9] или по расчетному количеству газа и воздуха, как при выборе горелки типа «труба в трубе».

**Рисунок 83.** Газомазутные комбинированные горелки высокоинтенсивного горения типа ГКВГ, разработанные Волгоградским ВНИИТмашем, предназначены для сжигания природного газа и мазута с холодным воздухом. Горелки дают короткий и широкий факел. Давление воздуха перед горелкой не менее 3 кПа, а мазута не менее 150 кПа с температурой не ниже  $80^\circ\text{C}$ . Пределы регулирования горелки по газу 1:5, по мазуту 1:2. Разработано пять типоразмеров горелок с номинальной производительностью по природному газу от 0,0042 до 0,0278  $\text{м}^3/\text{с}$  (от 15  $\text{м}^3/\text{ч}$  до 100  $\text{м}^3/\text{ч}$ ) с номинальным давлением газа перед горелкой 30 кПа. Работает горелка на газу следующим образом. Газ через тангенци-

альные отверстия в газовой трубе поступает в малую вихревую камеру, где встречается и интенсивно перемешивается с вихревым потоком воздуха. Дальнейшее перемешивание происходит в эжекторе. На выходе из горелки газоздушная смесь подхватывается закрученным потоком вторичного воздуха, выходящим из большой вихревой камеры. Образуется широкий закрученный короткий факел.

При работе горелки на мазуте, который на выходе из сопла попадает в эжектор малой вихревой камеры, где встречается с закрученным воздушным потоком. Из-за большой разницы скоростей этих потоков происходит дробление мазутной струи на капли и интенсивное смесеобразование. На выходе из горелки мазутно-воздушная смесь перемешивается с потоком вторичного воздуха и сгорает в коротком факеле. При работе горелки в центре вихревого факела создается разрежение, которое препятствует закоксовыванию мазутного сопла, а после окончания работы на мазуте очищает мазутное сопло от остатков топлива.

**Рисунок 84.** Газомазутная комбинированная горелка с акустическим излучателем типа КГМГ-А, разработанная ВНИИТмашем предназначена для сжигания природного газа и мазута с холодным или подогретым до  $400^{\circ}\text{C}$  воздухом.

Давление вентиляторного воздуха перед горелкой должно быть не менее 3 кПа, мазута от 50 до 300 кПа, компрессорного воздуха не менее 100 кПа, температура мазута не ниже  $80^{\circ}\text{C}$ . Пределы регулирования по газу и мазуту примерно 1:5, количество компрессорного воздуха  $0,8 \text{ м}^3/\text{кг}$  мазута. При работе на газе компрессорный воздух не подают. Разработано 8 типоразмеров горелок КГМГ-А1-КГМГ-А8 с производительностью от 0,0042 до  $0,0556 \text{ м}^3/\text{с}$  при давлении перед горелкой 60 кПа. При работе горелки на мазуте компрессорный воздух подается в горелку по газовой трубе и через тангенциальные отверстия попадает в акустический излучатель, где создает вихревые потоки. Выходя из сопла акустического излучателя вихревые потоки, создают акустическое поле, которое улучшает распыление мазута, интенсифицирует процессы перемешивания топлива с воздухом и горение.

Кроме того, акустический излучатель защищает мазутное сопло от воздействия высоких температур, а создающиеся в нем вихревые потоки имеют разрежение по оси, что препятствует закоксовыванию мазута. При работе на газе, проходя через акустический излучатель, вихревые потоки газа также создают акустическое поле, которое улучшает перемешивание газа с воздухом и обеспечивает полноту его сжигания с минимальным коэффициентом расхода воздуха.

#### 14 Запальники газогорелочных устройств

Запальные устройства и запальные горелки применяют в печах периодического действия при большом количестве горелок на агрегате, а также в том случае, если основные горелки эксплуатируются при таких режимах, когда они работают неустойчиво. Запальные горелки могут быть переносными или стационарными. Запально-защитные устройства должны устанавливаться на горелках, работающих в печах с температурой ниже температуры воспламенения, или же

при двухпозиционном регулировании в случае полного прекращения подачи газа в горелки. Наибольшее распространение получили газовые запальники конструкции Ленгипроинжпроекта, Мосгазпроекта, из стационарных запальных горелок – пилотно-запальное устройство типа ПЗУ-1 конструкции Теплопроекта и дежурная электрозапальная горелка конструкции ВНИИМТа.

**Рисунок 85.** Институтом Ленгипроинжпроект разработаны переносные газовые запальники: инжекционные однофакельные (а) и многофакельные (б), для работы при разрежении в рабочем пространстве теплотехнической установки, инжекционные однофакельные (в) для работы при давлении в рабочем пространстве, а также однофакельный двухпроводный запальник с принудительной подачей газа и воздуха (г), который может работать как при разрежении, так и при давлении в рабочем пространстве теплотехнической установки. Запальники предназначены для работы на природном газе с  $Q_H^p = 35,6 \text{ МДж/м}^3$  или сжиженном газе с  $Q_H^p = 92,1 \text{ МДж/м}^3$ .

**Рисунок 86.** Переносные инжекционные запальники типа ИПЗ, разработанные Мосгазпроектом предназначены для работы на природном газе с диаметром отверстия  $d_f=1,5 \text{ мм}$  и на пропан-бутановой смеси с диаметром отверстия  $d_f=1,0 \text{ мм}$ . Номинальная пропускная способность по природному газу  $0,000078 \text{ м}^3/\text{с}$  при давлении газа перед горелкой  $1,3 \text{ кПа}$ , по пропан-бутановому  $0,000031 \text{ м}^3/\text{с}$  при давлении газа перед горелкой  $3 \text{ кПа}$ . Пределы регулирования запальника по газу 1:4.

**Рисунок 87.** Электрогазовые пилотно-запальное устройство ПЗУ-1, разработанное Теплопроектом является стационарным двухпроводным запальным устройством, которое герметически крепится к корпусу основной горелки или к горелочной плите и имеет электроискровое зажигание. Пропускная способность пилотно-запального устройства по природному газу составляет от  $0,00014$  до  $0,00028 \text{ м}^3/\text{с}$  и работает оно следующим образом. Газ смешивается с воздухом в смесителе. Затем газоздушная смесь разветвляется в корпусе на два потока, один из которых через четыре отверстия диаметром  $1,5 \text{ мм}$  поступает в камеру зажигания. После поджигания от электрической искры горящая газоздушная смесь вытекает по центральной трубе пламепровода, выполненного из стали Х18Н10Т. Остальная газоздушная смесь через основное отверстие диаметром  $15 \text{ мм}$  проходит по наружному кольцевому зазору пламепровода, загораясь по выходу из насадки. Канал в огнеупорном блоке основной горелки, для установки ПЗУ-1, одновременно является его горелочным туннелем. Наблюдение за горением осуществляется через кварцевое стекло гляделки.

**Рисунок 88.** Дежурная электрозапальная горелка, разработанная ВНИИМ-Том, представляет собой видоизмененную конструкцию ПЗУ-1. Для стабилизации факела в выходном сечении горелки предусмотрена диффузорная корундовая труба, примыкающая к горелочному туннелю основной горелки. Электрозапальная горелка предназначена для работы в качестве постоянно действующей дежурной горелки. Номинальная пропускная способность горелки на газу  $0,00028 \text{ м}^3/\text{с}$  при давлении перед горелкой газа  $0,5$ , воздуха  $0,45 \text{ кПа}$  при  $\alpha = 0,9$ . Пределы регулирования по газу  $0,00014-0,00042 \text{ м}^3/\text{с}$ . Розжиг дежурной горелки

производится встроенной в неё электрической свечой, подключенной к стандартной индукционной катушке, питание которой осуществляется постоянным током напряжением 24 В.

**Рисунок 89.** Разработанное Теплопроектom пилотно-запальное устройство типа ПЗУ, отличается от ПЗУ-1 наличием контрольного электрода, служащего для контроля факела пилотной горелки. Электрод представляет собой стержень диаметром 6 мм, выполненный, из дисилицида молибдена и крепится в держателе, к которому подсоединяется провод внешней сети.

**Рисунок 90.** Запальник ЗЗУ предназначен для дистанционного розжига горелок, работающих на жидком или газообразном топливе с теплотой сгорания от 14,65 до 121,4 МДж/м<sup>3</sup>. оптимальная пропускная способность запальника по газу от 0,00042 до 0,0011 кг/с. Длина факела запальника примерно 800 мм. Центральный электрод запальника заключен в керамическую изоляцию и помещен в ствол запальника, заканчивается наконечником. Газ проходит через ствол запальника и воспламеняется на выходе из наконечника от электрической искры, возникающей в искровом промежутке между хвостовиком центрального электрода и кольцевым электродом наконечника. Поток воздуха обеспечивается путем подачи вентиляторного и компрессорного воздуха, а также может создаваться за счет разряжения в рабочем пространстве печи.

**Рисунок 91.** Газовый электрозапальник типа ЭЗ имеет следующие технические характеристики: диапазон давления подводимого газа к электрозапальнику 1-50 кПа; максимальная температура газа поступающего в запальник, +50<sup>0</sup>С; пропускная способность по природному газу при давлении 40 кПа 0,0014 кг/с; допустимые колебания напряжения, подводимого к электрозапальнику для воспламенения газа 6-12кВ; температура окружающего воздуха при относительной влажности 80% от 5 до 50<sup>0</sup>С. ЭЗ выпускается в четырех исполнениях, различающихся длиной, т.е. 500, 800, 1400, 2000 мм.

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

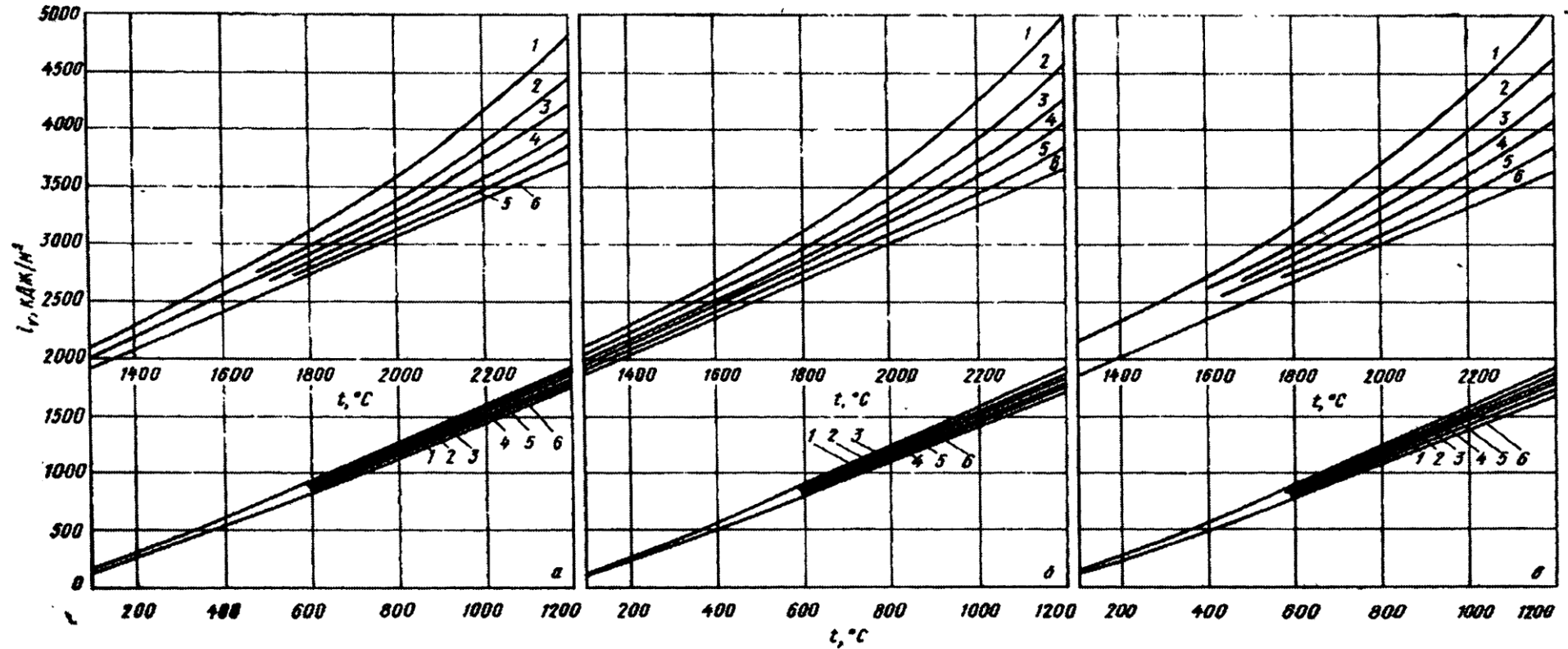
УДЕЛЬНАЯ ЭНТАЛЬПИЯ ГАЗОВ  $i$ , кДж/м<sup>3</sup>

Таблица Ж1 - Удельная энтальпия газов  $i$ , кДж/м<sup>3</sup>

t, °C	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO	H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	Воздух сухой	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> S	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
100	131,9	129,8	130,2	129,0	170,0	150,70	181,3	164,1	130,2	206,4	153,2	248,7
200	267,1	259,6	261,3	259,6	357,6	304,8	377,6	351,7	261,3	456,4	312,3	552,7
300	404,07	391,9	394,4	389,4	558,9	462,2	586,6	566,5	394,4	748,6	478,6	913,1
400	551,0	525,9	530,9	520,8	772,0	626,3	807,2	805,5	530,9	1075,2	655,1	1023,0
500	699,2	663,4	672,0	653,1	994,4	795,5	1034,1	1069,7	672,0	1431,9	833,2	1777,3
600	849,1	803,9	813,9	786,3	1225,9	969,7	1268,6	1356,5	813,9	1816,2	1024,9	2265,9
700	1005,3	946,6	961,3	923,0	1462,4	1148,9	1506,4	1664,7	958,4	2218,6	1222,1	2790,1
800	1158,9	1091,9	1108,7	1055,1	1678,1	1333,1	1745,1	1996,3	1105,3	2646,1	1426,9	3339,4
900	1318,8	1239,7	1258,6	1190,7	1951,9	1526,1	1993,3	2340,0	1258,6	3089,9	1605,2	3926,4
1000	1477,9	1390,0	1410,9	1331,4	2202,3	1725,0	2235,8	2700,5	1410,9	3546,2	1850,6	4530,1
1100	1639,6	1542,8	1565,9	1469,1	2459,3	1929,3	2487,0	3967,2	1565,9	4020,6	2072,5	5154,0
1200	1803,7	1698,2	1723,3	1612,8	2718,1	2130,2	2733,1	3436,5	1718,3	4500,8	2291,0	5790,3
1300	1964,9	1850,7	1883,2	1758,0	2977,2	2345,9	2988,1	3755,6	1877,8	-	-	-
1400	2127,7	2010,5	2039,8	1905,0	3241,4	2561,5	3247,3	4144,1	2033,9	-	-	-
1500	2292,3	2166,7	2198,1	2053,6	3504,4	2782,1	3510,6	4546,9	2204,4	-	-	-
1600	2458,5	2324,5	2358,0	2197,2	3770,6	3001,1	3778,2	-	2364,7	-	-	-
1700	2626,4	2484,0	2519,6	2348,8	4035,7	3231,4	4049,9	-	2526,7	-	-	-
1800	2796,0	2645,2	2682,9	2602,0	4304,0	3459,1	-	-	2690,4	-	-	-
1900	2967,2	2804,3	2847,9	2656,9	4572,0	3691,1	-	-	2847,9	-	-	-
2000	3140,1	2964,3	3006,1	2813,5	4848,3	3927,2	-	-	3014,5	-	-	-
2100	3305,9	3130,1	3174,0	2971,8	5116,3	4167,5	-	-	3182,8	-	-	-
2200	3481,7	3288,3	3334,4	3131,7	5388,4	4404,5	-	-	3343,6	-	-	-
2300	3659,3	3457,0	3495,6	3293,3	5660,6	4643,2	-	-	3505,2	-	-	-
2400	3828,4	3617,4	3667,6	3446,6	5920,1	4881,8	-	-	3677,7	-	-	-
2500	4008,9	3778,6	3830,9	3611,1	6209,0	5128,8	-	-	3841,4	-	-	-
2600	4180,1	3951,5	3995,0	3777,3	6552,3	5375,9	-	-	4016,8	-	-	-
2700	4362,6	4126,1	4171,3	3945,2	6837,0	5631,2	-	-	4195,2	-	-	-
2800	4546,7	4304,0	4350,1	4103,1	7125,9	5886,6	-	-	4362,6	-	-	-
2900	4722,7	4479,9	4530,1	4274,7	7419,0	6133,7	-	-	4542,7	-	-	-
3000	4911,1	4647,3	4710,2	4446,4	7712,1	6380,7	-	-	4710,2	-	-	-



Приложение К  
 Диаграмма  $i - t$



а - для газов: природного, коксового и смеси коксового и доменного при  $Q_H^P > 12 \text{ МДж/м}^3$ ; б - для газов: паровоздушного генераторного, смеси доменного и коксового при  $Q_H^P = 8-12 \text{ МДж/м}^3$  мазута, каменного угля, антрацита, кокса; в - для газов: водяного, генераторного, смеси доменного и коксового при  $Q_H^P < 8 \text{ МДж/м}^3$ , бурых углей, горючих сланцев, торфа и дров; 1 -  $V_L = 0\%$  (продукты сгорания без воздуха); 2 -  $V_L = 20\%$ ; 3 -  $V_L = 40\%$ ; 4 -  $V_L = 60\%$ ; 5 -  $V_L = 80\%$ ; 6 - чистый воздух.

Рисунок К.1 – диаграмма  $i - t$ .

ПРИЛОЖЕНИЕ Л

ТЕПЛОВЫЕ ЭФФЕКТЫ РЕАКЦИЙ ГОРЕНИЯ УГЛЕВОДОРОДОВ

Таблица Л1-Тепловые эффекты реакций горения углеводородов

Наименование	Уравнения реакций	H <sub>2</sub> O (пар)			H <sub>2</sub> O жидкость
		кДж/м <sup>3</sup>	кДж/моль	кДж/кг	кДж/моль
Метан	$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 = \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	35818	803112	50062	891202
Этан	$\text{C}_2\text{H}_6 + 3,5\text{O}_2 = 2\text{CO}_2 + 3\text{H}_2\text{O}$	63748	1429290	47533	1561425
н-Пропан	$\text{C}_3\text{H}_8 + 5\text{O}_2 = 3\text{CO}_2 + 4\text{H}_2\text{O}$	91255	2046047	46402	2222186
н-Бутан	$\text{C}_4\text{H}_{10} + 6,5\text{O}_2 = 4\text{CO}_2 + 5\text{H}_2\text{O}$	118646	2660083	45770	2880309
н-Пентан	$\text{C}_5\text{H}_{12} + 8\text{O}_2 = 5\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$	146077	-	-	-
Бензол	$\text{C}_6\text{H}_6 + 7,5\text{O}_2 = 6\text{CO}_2 + 3\text{H}_2\text{O}$	140375	3147008	40294	3279144
Метилбензол	$\text{C}_7\text{H}_8 + 9\text{O}_2 = 7\text{CO}_2 + 4\text{H}_2\text{O}$	168393	-	-	-
Этилбензол	$\text{C}_8\text{H}_{10} + 10,5\text{O}_2 = 8\text{CO}_2 + 5\text{H}_2\text{O}$	195850	-	-	-
Пропиленбензол	$\text{C}_9\text{H}_{12} + 12\text{O}_2 = 9\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$	223232	-	-	-
Этилен	$\text{C}_2\text{H}_4 + 3\text{O}_2 = 2\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	59063	1324096	47202	1412166
Пропилен	$\text{C}_3\text{H}_6 + 4,5\text{O}_2 = 3\text{CO}_2 + 3\text{H}_2\text{O}$	86001	-	-	-
Бутилен	$\text{C}_4\text{H}_8 + 6\text{O}_2 = 4\text{CO}_2 + 4\text{H}_2\text{O}$	113508	2544695	45356	2720876
Пентилен	$\text{C}_5\text{H}_{10} + 7,5\text{O}_2 = 5\text{CO}_2 + 5\text{H}_2\text{O}$	140885	-	-	-
Ацетилен	$\text{C}_2\text{H}_2 + 2,5\text{O}_2 = 2\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	56053	1256207	48249	1300253
Метилацетилен	$\text{C}_3\text{H}_4 + 4\text{O}_2 = 3\text{CO}_2 + 3\text{H}_2\text{O}$	100140	-	-	-
Этилацетилен	$\text{C}_4\text{H}_6 + 5,5\text{O}_2 = 4\text{CO}_2 + 3\text{H}_2\text{O}$	110075	-	-	-
Пентин	$\text{C}_5\text{H}_8 + 7\text{O}_2 = 5\text{CO}_2 + 4\text{H}_2\text{O}$	137390	-	-	-
Циклопентан	$\text{C}_5\text{H}_{10} + 7,5\text{O}_2 = 5\text{CO}_2 + 5\text{H}_2\text{O}$	138374	-	-	-
Метилциклопентан	$\text{C}_6\text{H}_{12} + 9\text{O}_2 = 6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$	165420	-	-	-
Этилциклопентан	$\text{C}_7\text{H}_{14} + 10,5\text{O}_2 = 7\text{CO}_2 + 7\text{H}_2\text{O}$	192873	-	-	-
Пропилциклопентан	$\text{C}_8\text{H}_{16} + 12\text{O}_2 = 8\text{CO}_2 + 8\text{H}_2\text{O}$	220301	-	-	-
Циклогексан	$\text{C}_6\text{H}_{12} + 9\text{O}_2 = 6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$	164688	-	-	-
Метилциклогексан	$\text{C}_7\text{H}_{14} + 10,5\text{O}_2 = 7\text{CO}_2 + 7\text{H}_2\text{O}$	191638	-	-	-
Этилциклогексан	$\text{C}_8\text{H}_{16} + 12\text{O}_2 = 8\text{CO}_2 + 8\text{H}_2\text{O}$	219242	-	-	-
Пропилциклогексан	$\text{C}_9\text{H}_{18} + 13,5\text{O}_2 = 9\text{CO}_2 + 9\text{H}_2\text{O}$	246644	-	-	-

ПРИЛОЖЕНИЕ М

ЖАРОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ, °С, НЕКОТОРЫХ ТОПЛИВ

Таблица М.1- Жаропроизводительность, °С, некоторых топлив (для ориентировочных подсчетов)

	Избыток воздуха, %, при температуре, °С			
	0	50	100	
Окись углерода	2400	1850	1500	
Углерод	2240	1640	1300	
Водород	2200	1680	1300	
Природный газ ( $Q_n^p = 35567$ кДж/м <sup>3</sup> )	2050	1550	1170	
Нефть ( $Q_n^p = 42031$ кДж/м <sup>3</sup> )	2150	1590	1220	
Древесина безводная ( $Q_n^p = 17585$ кДж/м <sup>3</sup> )	2050	1520	1170	
Древесина при влажности:				
20% ( $Q_n^p = 14235$ кДж/м <sup>3</sup> )	1850	1420	1110	
40% ( $Q_n^p = 10048$ кДж/м <sup>3</sup> )	1670	1290	1080	
50% ( $Q_n^p = 7954$ кДж/м <sup>3</sup> )	1510	1200	1000	
Торфяная масса безводная ( $Q_n^p = 22337$ кДж/м <sup>3</sup> )	2050	1530	1190	
Торф при влажности:				
20% ( $Q_n^p = 17333$ кДж/м <sup>3</sup> )	1920	1440	1160	
40% ( $Q_n^p = 12393$ кДж/м <sup>3</sup> )	1710	1320	1090	
50% ( $Q_n^p = 9910$ кДж/м <sup>3</sup> )	1570	1210	1010	
Буроугольная масса безводная ( $Q_n^p = 27604$ кДж/м <sup>3</sup> )	2060	1540	1210	
Бурый уголь при влажности:				
20% ( $Q_n^p = 21604$ кДж/м <sup>3</sup> )	2030	1500	1190	
40% ( $Q_n^p = 15575$ кДж/м <sup>3</sup> )	1800	1400	1120	
Каменный уголь:				
безводный ( $Q_n^p = 32196$ кДж/м <sup>3</sup> )	2180	1555	1220	
при влажности 5% ( $Q_n^p = 80857$ кДж/м <sup>3</sup> )	2170	1545	1210	
Антрацит:				
безводный, на горючую массу ( $Q_n^p = 35253$ кДж/м <sup>3</sup> )	2270	1565	1220	
при влажности 5% ( $Q_n^p = 33076$ кДж/м <sup>3</sup> )	2260	1555	1210	
	Избыток воздуха, %, при температуре, °С			
Топливо	0	20	40	100
Доменный газ при $Q_n^{Д.Г}$ кДж/м <sup>3</sup> :	1450	1340	1260	1050
3869 .....	-	-	-	-
3977 .....	1500	1400	1300	1070
4032 .....	1530	1430	1330	1100
4187 .....				
Генераторный газ ( $Q_n^{Г.Г} = 5422$ кДж/м <sup>3</sup> )	1780	1610	1400	1190
Воздушно-генераторный газ. ( $Q_n^{В.Г} = 4430$ кДж/м <sup>3</sup> )	1600	1500	1380	1150
Генераторный газ из бурого угля ( $Q_n^{Г.Б} = 6163$ кДж/м <sup>3</sup> )	1800	1620	1500	1200
Калашниковый газ торфяной домны: на обыкновенном дутье ( $Q_n^K = 6435$ кДж/м <sup>3</sup> )	1830	1640	1520	1210
на кислородном дутье ( $Q_n^{К.К} = 11062$ кДж/м <sup>3</sup> )	2100	1860	1630	1300
Коксовый газ ( $Q_n^{К.Г} = 16027$ кДж/м <sup>3</sup> )	2100	1800	1550	1230
Водяной газ ( $Q_n^{В.Г} = 10819$ кДж/м <sup>3</sup> )	2220	2000	1800	1360



ПРИЛОЖЕНИЕ Н

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАСХОД ВОЗДУХА И ОБЪЕМ ДЫМА

Таблица Н.1-Теоретический расход воздуха  $L_{1000}$  и объем дыма  $V_{1000}$  на 1000 кДж [ $L_{4,2}$  и  $V_{4,2}$  на 4,2 МДж (1000 ккал)] при сжигании различных топлив

Название топлива	$L_{1000}, \text{ м}^3/1000 \text{ кДж}$ ( $\text{м}^3/4,2 \text{ МДж}$ )	$V_{1000} \text{ М}^3/1000 \text{ кДж}$ ( $\text{М}^3/4,2 \text{ МДж}$ )
Кокс, влажность < 5%	0,263 (1,10)	0,265 (1,11)
Антрацит	0,263 (1,10)	0,270 (1,13)
Каменный уголь	0,260 (1,09)	0,270 (1,13)
Бурый уголь, влажность, %		
20	0,265 (1,11)	0,296 (1,24)
40	0,274 (1,15)	0,327 (1,37)
Торф, влажность, %:		
20	0,265 (1,11)	0,305 (1,28)
30	0,270 (1,13)	0,327 (1,37)
40	0,274 (1,15)	0,348 (1,46)
50	0,289 (1,21)	0,382 (1,60)
Дрова, влажность, % :		
20	0,263 (1,10)	0,317 (1,33)
30	0,272 (1,14)	0,344 (1,44)
40	0,277 (1,16)	0,368 (1,54)
50	0,294 (1,23)	0,413 (1,73)
Мазут сухой	0,260 (1,09)	0,279 (1,17)
Мазут влажностью 3%	0,265 (1,11)	0,286 (1,20)
Природный газ	0,265 (1,11)	0,296 (1,24)
Коксовый газ ( $Q_n^{K.G} = 15910 \text{ кДж/м}^3$ )	0,244 (1,02)	0,289 (1,21)
Водяной газ ( $Q_n^{B.G} = 10802 \text{ кДж/м}^3$ )	0,208 (0,87)	0,263 (1,10)
Двойной водяной газ	0,217 (0,91)	0,284 (1,19)
Генераторный газ очищенный:		
воздушно-генераторный ( $Q_n^{B.G} = 4430 \text{ кДж/м}^3$ )	0,191 (0,80)	0,382 (1,60)
генераторный ( $Q_n^G = 5422 \text{ кДж/м}^3$ )	0,200 (0,84)	0,346 (1,45)
генераторный буроугольный ( $Q_n^{B.G} = 6163 \text{ кДж/м}^3$ )	0,210 (0,88)	0,339 (1,42)
Генераторный газ неочищенный	0,210 (0,88)	0,339 (1,42)
То же, генератор непосредственно примыкает к печи:		
из каменного угля ( $Q_n^G = 5234 \text{ кДж/м}^3$ )	0,203 (0,85)	0,353 (1,40)
из бурого угля, торфа или древесины ( $Q_n = 6280 \text{ кДж/м}^3$ )	0,212 (0,89)	0,382-0,394 (1,60-1,65)
Доменный газ очищенный при $30^0\text{C}$ $Q_n^{D.G}, \text{ кДж/м}^3$ :		
3349 .....	0,191 (0,81)	0,458 (1,92)
3768 .....	0,193 (0,82)	0,418 (1,75)
4187 .....	0,196 (0,83)	0,411 (1,72)
4605 .....	0,198 (0,84)	0,406 (1,70)
Смесь доменного и коксового газов при теплоте сгорания доменного газа ( $Q_n^{D.G} = 3977 \text{ кДж/м}^3$ ), коксового газа ( $Q_n^{K.G} = 15910 \text{ кДж/м}^3$ ) и при следующих соотношениях компонентов:		
доменного газа 75%, коксового газа 26%; $Q_n^{cm} = 6954 \text{ кДж/м}^3$	0,222 (0,93)	0,341 (1,43)
доменного газа 70%, коксового газа 30%; $Q_n^{cm} = 7557 \text{ кДж/м}^3$	0,227 (0,95)	0,334 (1,40)
доменного газа 60%, коксового газа 40%; $Q_n^{cm} = 8750 \text{ кДж/м}^3$	0,232 (0,97)	0,322 (1,35)
доменного газа 50%, коксового газа 50%; $Q_n^{cm} = 9944 \text{ кДж/м}^3$	0,234 (0,98)	0,313 (1,31)
доменного газа 40%, коксового газа 60%; $Q_n^{cm} = 11137 \text{ кДж/м}^3$	0,236 (0,99)	0,305 (1,28)

ПРИЛОЖЕНИЕ П

СОСТАВ И НЕКОТОРЫЕ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГАЗООБРАЗНОГО ТОПЛИВА

Таблица П.1- Состав и некоторые теплотехнические характеристики газообразного топлива

Газы	Состав газа, % (объемн)								Теплота сгорания газа, кДж/м <sup>3</sup>		Теоретический расход воздуха $L_{теор}, \text{м}^3/\text{м}^3 \text{газа}$	Объем продуктов сгорания $V_{теор}, \text{м}^3/\text{м}^3 \text{газа}$	Жаропроизводительность, $t'_{ж}, \text{°C}$		
	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	C <sub>m</sub> H <sub>n</sub>	CO	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> + +C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	Q <sub>B</sub>	Q <sub>H</sub>			без учета влаги воздуха	с учетом влаги воздуха	
Газы высокой жаропроизводительности:															
водяной газ .....	6,3	0,2	-	38	51	0,5	4,0	-	11514	10467	2,2	2,7	2210	2180	
газ, полученный при газификации под высоким давлением (2,5 МН/м <sup>2</sup> ) .....	3	0,3	0,7	18	56	18	4,0	-	17124	15114	3,5	4,2	2130	2100	
газ нефтезаводской (Москва) .....	-	-	27	3	12	58	-	-	41161	38435	9,9	10,8	2120	2090	
сжиженный газ .....	-	-	-	-	-	-	-	50+50	113797	104670	27,4	29,6	2110	2080	
двойной водяной газ .....	15	0,2	0,8	27	46	8	3	-	13063	11807	2,6	3,2	2100	2070	
коксовый газ из доменных углей .....	3	1	2	7	58	25	4	-	20306	18003	4,3	5,0	2120	2090	
паро-кислородный газ .....	20,3	0,2	0,5	34	39	3	3	-	10844	9923	2,1	2,7	2050	2020	
коксовый газ из сланца .....	15	-	3	16	39	24	3	-	18467	16580	4,0	4,7	2040	2010	
нефтепромысловый газ .....	1,0	-	-	-	-	20-60	3-10	20-30	-	33494-62802	12,2	13,2	2030	2000	
газ полукоксый из каменных углей .....	13	-	7	9	9	54	8	-	28219	25539	6,6	7,5	2060	2030	
природный газ .....	-	-	-	-	-	98	2	-	39523	35462	9,4	10,4	2040	2010	
Газы средней жаропроизводительности:															
смешанный газ (50% коксового и 50% доменного газов) .....	7	-	1	17	30	13	32	-	12100	10969	2,5	3,3	1980	1950	
генераторный газ из битуминозных топлив (прямой процесс газификации) .....	7	0,2	0,3	28	13	2,5	49	-	6406	6029	1,2	2,0	1750	1720	
Газы пониженной жаропроизводительности:															
смешанный генераторный газ из тощих топлив .....	6	-	-	27	13	0,6	53,4	-	5317	5024	1,0	1,8	1670	1640	
доменный газ(древесноугольный) .....	12	-	-	27	8	1,8	51,2	-	5150	4899	1,0	1,9	1590	1560	
воздушный газ .....	1	-	-	32,5	0,5	-	66	-	4187	4145	0,8	0,8	1560	1530	

Продолжение табл. П.1

Газы	Состав газа, % (объемн.)								Теплота сгорания газа, кДж/м <sup>3</sup>		Теоретический расход воздуха $L_{теор}, \text{м}^3/\text{м}^3 \text{газа}$	Объем продуктов сгорания $V_{теор}, \text{м}^3/\text{м}^3 \text{газа}$	Жаропроизводительность, °С		
	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	C <sub>m</sub> H <sub>n</sub>	CO	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	H <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> + +C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	Q <sub>B</sub>	Q <sub>H</sub>			без учета влаги воздуха $t'_{ж}$	с учетом влаги воздуха $t_{ж}$	
доменный газ (коксовый) .....	10,5	-	-	28	2,7	0,3	58,5	-	4020	3936	0,8	1,6	1470	1400	
Газы низкой жаропроизводительности: ваграночный газ с использованием физического тепла (t = 600°С) .....	13,1	-	-	13,1	-	-	73,8	-	1675	1674	0,3	1,2	1250	1230	
	продувочный газ (антрацитовый) с использованием физического тепла (t = 600°С)..	14,5	0,2	-	8,8	2,3	0,2	74	-	1507	1424	0,3	1,2	1180	1160
	газ сажевых заводов.....	4,8	1,4	-	4,9	11,6	2,0	75,3	-	2931	2596	0,5	1,4	1180	1160
	продувочный газ (коксовый) с использованием физического тепла .....	17,5	0,2	-	5,0	1,3	-	76	-	795	754	0,1	1,1	950	930
	ваграночный газ холодный.....	13,1	-	-	13,1	-	-	73,8	-	1675	1675	0,3	1,2	860	840
	продувочный антрацитовый газ холодный.....	14,5	0,2	-	8,8	2,3	0,2	74	-	1507	1424	0,3	1,2	770	750
	продувочный (коксовый) газ холодный .....	17,5	0,2	-	5,0	1,3	-	76	-	795	754	0,1	1,1	470	450

ПРИЛОЖЕНИЕ Р

ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕКОТОРЫХ ГАЗОВ

Таблица Р.1- Теплотехнические характеристики некоторых нефтепромысловых (попутных) газов

Месторождение	Теоретический объем воздуха $L_{теор}, \text{м}^3/\text{м}^3$	Объем продуктов сгорания, м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>		Отношение объемов сухих и влажных продуктов сгорания $B$	Энтальпия продуктов сгорания, кДж/м <sup>3</sup>		Жаропроизводительность (при сжигании в абсолютно сухом воздухе) $t'_{ж}$ , °С	Жаропроизводительность (при сжигании в воздухе, содержащем 1% влаги) $t_{ж}$ , °С	$RO_{2_{max}}$ сухих продуктов сгорания, % (объемн.)
		$V_{сух}$	$V_{теор}$		$i_{v_{сух}}$	$i_v$			
Гуймазинское	12,3	11,5	13,7	0,84	4061	3433	2040	2010	13,0
Гуймазинское	15,6	14,2	17,1	0,83	4187	3475	2080	2050	13,2
Мухановское	14,6	13,3	16,0	0,83	4145	3475	2080	2050	13,0
Мухановское	16,1	14,7	17,6	0,83	4187	3475	2080	2050	13,2
Ромашкинское	15,6	14,3	17,1	0,83	4187	3475	2080	2050	13,2
Шугуровское	8,7	8,4	9,9	0,84	3936	3308	1940	1940	12,6





ПРИЛОЖЕНИЕ С

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
РАЗЛИЧНЫХ ТОПЛИВ

Таблица С.1- Сравнительные теплотехнические характеристики различных топлив

Наименование топлива	Плотность $\rho_0$ , кг/м <sup>3</sup>	Низшая объёмная теплота сгорания $Q_{об}$ , МДж/м <sup>3</sup>	Низшая массовая теплота сгорания $Q_{масс}$ , МДж/кг	Теоретический расход воздуха $L_{теор}$ , м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	Расход воздуха на 1000 кДж, $L_{1000}$ , м <sup>3</sup> /1000кДж, на 4,2 МДж, $L_{4,2}$ (м <sup>3</sup> /4,2)	Объем продуктов сгорания $V_{теор}$ , м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup> газа	Объем продуктов сгорания на 1000 кДж; $V_{1000}$ , м <sup>3</sup> /1000 кДж, на 4,2 МДж, $V_{4,2}$ (м <sup>3</sup> /4,2)	Плотность продуктов сгорания $\rho_{пр.г.}$ , кг/м <sup>3</sup>
Углерод аморфный	-	-	34,1	8,90*	0,260 (1,09)	8,90*	0,260 (1,09)	1,40
Водород	0,090	10,8	121,0	2,38	0,220 (0,920)	2,88	0,268 (1,12)	1,09
Окись углерода	1,250	12,77	10,13	2,38	0,188 (0,788)	2,88	0,227 (0,95)	1,50
Метан	0,715	35,8	50,25	9,52	0,265 (1,11)	10,52	0,294 (1,23)	1,23
Этан	1,358	63,8	47,5	16,66	0,260 (1,09)	18,16	0,284 (1,19)	1,25
Пропан	2,030	91,4	46,4	23,80	0,260 (1,09)	25,80	0,284 (1,19)	1,26
Бутан	2,710	119,0	45,8	30,94	0,257 (1,08)	33,44	0,281 (1,18)	1,27
Пентан	3,214	146,0	45,5	38,08	0,260 (1,09)	41,08	0,281 (1,18)	1,27
Сероводород	1,52	22,3	29,1	7,14	0,262 (1,10)	7,64	0,327 (1,37)	1,28
Природный газ: дашавский .....	0,730	36,0	49,0	9,52	0,262 (1,10)	10,86	0,288 (1,21)	1,21
саратовский .....	0,780	35,18	44,80	9,23	0,263 (1,10)	10,30	0,292 (1,22)	1,17
ставропольский .....	0,735	35,18	47,30	9,30	0,263 (1,10)	10,42	0,296 (1,24)	1,19
шебелинский .....	0,782	37,21	48,20	9,85	0,263 (1,10)	10,90	0,287 (1,20)	1,25
Коксовый газ	0,590	16,71	27,75	4,06	0,244 (1,02)	4,82	0,289 (1,21)	1,16
Водяной газ	0,670	10,05	16,71	2,19	0,211 (0,88)	2,74	0,263 (1,10)	1,28
Доменный газ	1,30	4,18	3,22	0,82	0,196 (0,82)	1,67	0,403 (1,675)	1,40
Смесь коксового и доменного газов $Q_{н}^p = 8,37$ МДж/м <sup>3</sup>	1,03	8,37	8,25	1,91	0,227 (0,95)	2,72	0,325 (1,360)	1,29
Генераторный газ ( $Q_{н}^p = 4,77$ МДж/м <sup>3</sup> )	1,04	4,77	4,61	1,00	0,211 (0,88)	1,85	0,387 (1,62)	1,34
Мазут: распылитель-воздух	-	-	43,4	10,71*	0,246 (1,03)	11,40*	0,263 (1,10)	1,28
распылитель-водяной пар	-	-	43,4	10,71*	0,246 (1,03)	12,64*	0,292 (1,22)	1,21
Каменный уголь (газовый)	-	-	25,58	7,10*	0,258 (1,08)	7,48*	0,273 (1,14)	1,33
Антрацит	-	-	31,40	7,28*	0,232 (0,97)	7,62*	0,244 (1,02)	1,31
Кокс	-	-	23,10	7,24*	0,263 (1,1)	7,20*	0,260 (1,09)	1,30

ПРИЛОЖЕНИЕ Т

СОСТАВ И ХАРАКТЕРИСТИКА ДЫМА РАЗЛИЧНЫХ ТОПЛИВ

Таблица Т.1 - Состав и характеристика дыма различных топлив

Наименование топлива	Масса продуктов сгорания на 1000 кДж; $G_{\text{отх. г.}}$ , кг/1000 кДж (на 4,2 МДж, кг/4,2)	Объем воздуха и топлива, вступающих в реакцию L+B, $m^3/1000$ кДж, ( $m^3/4,2$ )	Состав продуктов сгорания % (объемн.)			Удельная энтальпия продуктов сгорания $t_v$ , МДж/м <sup>3</sup>	Удельная энтальпия продуктов сгорания $t_G$ , МДж/м <sup>3</sup>	Жаропродуцительность $t_{ж}$ , °С
			CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>			
Углерод аморфный	0,365 (1,53)	-	21,0	-	79,0	3,83	2,74	2365
Водород	0,294 (1,23)	0,313 (1,31)	-	34,7	65,3	3,75	3,39	2240
Окись углерода	0,340 (1,42)	0,268 (1,12)	34,7	-	65,3	4,33	2,93	2380
Метан	0,361 (1,51)	0,266 (1,11)	9,5	19,0	71,5	3,41	3,45	2040
Этан	0,355 (1,49)	0,277 (1,16)	11,0	16,5	72,5	3,49	2,80	2050
Пропан	0,361 (1,51)	0,272 (1,14)	11,6	15,4	73,0	3,54	2,81	2107
Бутан	0,358 (1,50)	0,267 (1,12)	12,0	15,0	73,0	3,55	2,79	2117
Пентан	0,358 (1,50)	0,267 (1,12)	12,2	14,6	73,2	3,55	2,79	2120
Сероводород	0,503 (2,11)	0,348 (1,46)	13,0	13,0	74,0	3,27	2,55	1900
Природный газ: дашавский .....	0,348 (1,46)	0,291 (1,22)	9,26	21,00	69,74	3,35	2,76	2040
саратовский .....	0,342 (1,43)	0,292 (1,22)	9,80	19,00	71,20	3,43	3,93	2060
ставропольский .....	0,347 (1,45)	0,292 (1,22)	9,40	20,0	70,60	3,38	2,72	2040
шебелинский .....	0,361 (1,51)	0,290 (1,21)	9,7	18,1	72,2	3,35	2,68	2020
Коксовый газ	0,335 (1,40)	0,304 (1,27)	7,9	22,1	70,0	3,46	2,98	2070
Водяной газ	0,337 (1,41)	0,299 (1,25)	6,4	28,6	65,0	3,85	3,03	2210
Доменный газ	0,557 (2,35)	0,435 (1,82)	23,0	3,0	74,0	2,50	1,78	1487
Смесь коксового и доменного газов $Q_n^p = 8,37$ МДж/м <sup>3</sup>	0,418 (1,75)	0,347 (1,45)	14,0	14,5	71,5	3,07	2,36	1824
Генераторный газ ( $Q_n^p = 4,77$ МДж/м <sup>3</sup> )	0,519 (2,17)	0,418 (1,75)	17,1	6,7	76,2	2,59	1,94	1600
Мазут: распылитель - воздух	0,336 (1,41)	-	13,5	12,3	74,2	3,08	2,93	2245
распылитель - водяной пар	0,352 (1,47)	-	10,7	21,0	68,3	3,39	2,81	2050
Каменный уголь (газовый)	0,364 (1,52)	-	17,1	8,0	74,9	3,68	2,78	2180
Антрацит	0,320 (1,34)	-	21,1	3,0	75,9	4,12	2,65	2290
Кокс	0,340 (1,42)	-	20,5	1,3	78,2	4,03	3,09	2200

## ПРИЛОЖЕНИЕ У

### РАЗРАБОТКА МЕРОПРИЯТИЙ ПО УВЕЛИЧЕНИЮ ТЕПЛОВОЙ МОЩНОСТИ ДЕЙСТВУЮЩЕГО ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОГО АГРЕГАТА (БЕЗ РЕКОНСТРУКЦИИ)

В процессе эксплуатации теплотехнического агрегата иногда возникает необходимость в увеличении максимальной тепловой мощности на 10-50%, однако, прямое увеличение расхода топлива практически невозможно, так как узким местом, препятствующем работе теплотехнического агрегата на увеличенной мощности является система подачи воздуха и отвода продуктов сгорания. Поэтому необходимо разработать мероприятия для выполнения поставленной цели, обеспечивающие подачу воздуха и отвод продуктов сгорания при увеличенной мощности. При этом исходными данными обычно являются: вид и состав топлива, максимальная тепловая мощность теплотехнического агрегата (паровой котел, парогенератор, нагревательная термическая или плавильная печь и т.д.), процент увеличения тепловой мощности тепловой установки.

Задачу необходимо решать в следующем порядке:

- определить основной вид теплообмена теплотехнической установки и кратко охарактеризовать технологический процесс тепловой обработки материалов в ней;
- выбрать способ сжигания топлива с учетом вида теплообмена в тепловом агрегате (установке);
- пересчитать топливо на рабочий состав при условии если он задан в другом составе и рассчитать теплоту сгорания топлива.

Расчет горения топлива возможно выполнить двумя путями:

- аналитический метод расчета, в котором расход воздуха и полученное количество продуктов сгорания и состав дыма определяют по уравнениям горения горючих составляющих топлива [35 с. 75]; или определяют по таблицам Н.1, С.1 в

зависимости от вида топлива.

- приближенный метод расчета, заключающийся в том, что чем больше теплота сгорания топлива ( $Q_H^P$ ), тем больше воздуха необходимо для сгорания единицы топлива. Так, теоретически необходимое количество воздуха ( $\alpha=1$ ) для сжигания топлива можно определить,  $\text{м}^3/\text{кг}$  ( $\text{м}^3/\text{м}^3$ ):

$$V_o^B = k \cdot Q_H^P / 4186$$

где  $k$  – поправочный коэффициент, зависящий от рода топлива. Так, для водорода – 0,93; углерода – 1,1; антрацит – 1,1; др. виды углей – 1,1; жидкое топливо – 1,1; природный газ – 1,11; метан – 1,11; торф – 1,1; дрова – 1,06; коксовый газ – 1,02; окись углерода - 0,788; доменный газ – 0,81; генераторный газ - 0,81;

$Q_H^P$  – низшая теплота сгорания топлива,  $\text{кДж}/\text{кг}$  ( $\text{кДж}/\text{м}^3$ )

Для быстрого и ориентировочного определения теоретически необходимого расхода воздуха можно исходить из положения, что на 4186 кДж теплоты сгорания топлива требуется приблизительно  $1 \text{ м}^3$  воздуха. Формулы для приближенного расчета теоретически необходимого воздуха и количества продуктов сгорания приведены в таблице У.1.

Определим действительные расходы воздуха и количество продуктов сгорания при максимальной тепловой мощности

$$V_B = V_o^0 \cdot \alpha \cdot V^T; V_{П.Г} = V_{П.Г}^0 \cdot \alpha \cdot V^T \text{ или } V_B = V_o^0 \cdot \alpha \cdot B; V_{П.Г} = V_{П.Г}^0 \cdot \alpha \cdot B$$

Аналогично определяем расход воздуха и полученное количество продуктов сгорания при  $B_1, V_1^T$  на сверхмаксимальной мощности  $M_1$  по формулам:

$$V_{B1} = V_o^0 \cdot \alpha \cdot V_1^T; V_{ПГ1} = V_{ПГ}^0 \cdot \alpha \cdot V_1^T \text{ или } V_{B1} = V_o^0 \cdot \alpha \cdot B_1^T; V_{ПГ1} = V_{ПГ}^0 \cdot \alpha \cdot B_1^T$$

где  $\alpha$  – коэффициент расхода атмосферного воздуха ;

$V_o^0, V_{П.Г}^0$  - теоретически необходимое количество атмосферного воздуха и продуктов сгорания при  $\alpha = 1.0$  (из расчёта горения топлива);

$V^T, (B)$  – расход топлива,  $\text{м}^3/\text{с}$  ( $\text{кг}/\text{с}$ ), который определяется

по формуле:

$$V^T = \frac{M}{Q_n^p}, \quad V_1^T = \frac{M_1}{Q_n^p} \quad \text{или} \quad B = \frac{M}{Q_n^p}, \quad B_1 = \frac{M_1}{Q_n^p}$$

где  $M$ ;  $M_1$  – максимальная и сверхмаксимальная тепловая мощность агрегата, кВт(МВт).

Таблица У.1 – Эмпирические формулы для определения теоретически необходимого количества воздуха и количества продуктов сгорания ( $\alpha=1$ ).

Топливо	$V_B^o$	$V_{п.г}^o$
Дрова	$4,66 \cdot (1 - \frac{Q_n^p}{4186}), \text{ м}^3/\text{кг}$	$5,3 - 4,055 \cdot \frac{Q_n^p}{4186}, \text{ м}^3/\text{кг}$
Уголь	$1,01 \cdot \frac{Q_n^p}{4186} + 0,5, \text{ м}^3/\text{кг}$	$0,89 \cdot \frac{Q_n^p}{4186} + 1,65, \text{ м}^3/\text{кг}$
Жидкое топливо	$0,85 \cdot \frac{Q_n^p}{4186} + 2,0, \text{ м}^3/\text{кг}$	$1,11 \cdot \frac{Q_n^p}{4186}, \text{ м}^3/\text{кг}$
Газообразное топливо ( $Q_n^p < 12,56 \text{ МДж/м}^3$ )	$0,85 \cdot \frac{Q_n^p}{4186}, \text{ м}^3/\text{м}^3$	$0,725 \cdot \frac{Q_n^p}{4186} + 1,0, \text{ м}^3/\text{м}^3$
Газообразное топливо ( $Q_n^p > 12,56 \text{ МДж/м}^3$ )	$1,09 \cdot \frac{Q_n^p}{4186} - 0,25, \text{ м}^3/\text{м}^3$	$1,14 \cdot \frac{Q_n^p}{4186} + 0,25, \text{ м}^3/\text{м}^3$
Коксодоменная смесь	$\frac{Q_n^p}{4186} - 0,2, \text{ м}^3/\text{м}^3$	$0,945 \cdot \frac{Q_n^p}{4186} + 0,765, \text{ м}^3/\text{м}^3$

Сравнивая рассчитанные действительные количества расходов воздуха теплотехнической установки, работающей в обычном режиме и в режиме увеличенной тепловой мощности, установили, что существующая система подачи воздуха не может обеспечить подачу необходимого количества воздуха при сжигании увеличенного количества топлива при работе на сверхмаксимальной нагрузке. Эту задачу можно решить путём установки вентилятора более высокой производительности и напора создаваемого им, предварительно рассчитав эти величины или обогатить воздух

кислородом так, чтобы количество воздуха осталось без изменения, при увеличении максимальной тепловой мощности агрегата на заданную величину от 10-15%.

Сравнивая количество полученных расчётом продуктов сгорания теплотехнического агрегата, работающего в обычном режиме и в режиме увеличиваемой мощности, пришли к выводу, что существующая система отвода продуктов сгорания не сможет обеспечить их полного удаления из установки. Определяем во сколько раз количество дымовых газов при сверхмаксимальной нагрузке превышает количество газов при максимальной нагрузке,  $n = V_{\text{дг}} / V_{\text{дг}}$ .

При увеличенном количестве продуктов сгорания обеспечить отвод их можно двумя методами: первый заключается, в установке более мощного дымососа; второй – обогатить воздух кислородом с таким расчётом, чтобы количество продуктов сгорания оставалось без изменения, при увеличении тепловой мощности на заданную величину от 10-50%.

Второй вариант выбираем, если на предприятии существует производство кислорода. Задача решается путем определения степени обогащения воздуха кислородом в зависимости от увеличения тепловой мощности действующего агрегата [31 с. 107] с таким расчётом, чтобы количество дыма образовавшегося при сжигании увеличенного количества топлива, при сверхмаксимальной тепловой нагрузке, осталось таким же как и при максимальной нагрузке работающей тепловой установки. Если нет кислорода, тогда рассчитываем потери сопротивления по дымовому тракту и необходимую производительность дымососа с учётом образовавшихся продуктов сгорания, выбираем дымосос, делая запас 10-20% по этим параметрам.

## ПРИЛОЖЕНИЕ Ф

### ПЕРЕВОД ОТОПЛЕНИЯ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОГО АГРЕГАТА С ОДНОГО ВИДА ТОПЛИВА НА ДРУГОЙ.

На практике очень часто возникает необходимость перевода отопления теплотехнической установки (котла, парогенератора, плавильных, нагревательных и термических печей) с одного вида топлива на другой, а именно: с газообразного на жидкое (твёрдое), с твёрдого (жидкого) на газообразное, а также на их смеси.

Эту задачу необходимо решать следующим путём:

- необходимо установить какой вид теплообмена преобладает в теплотехнической установке. Дать краткую характеристику этого способа (указать преимущества и недостатки данного вида теплообмена и указать пути его возможного улучшения);

- определить способ сжигания топлива в теплотехнической установке и тепловую мощность её  $M = B \cdot Q_n^p$ ;

- учитывая выше перечисленные условия, обосновать выбор топлива на работающей установке, которое может обеспечить тепловую обработку материала, не изменяя ни вида теплообмена, ни способа сжигания топлива;

- рассчитываем расход топлива на одном и на другом виде топлива по формуле:

$$B = \frac{M}{Q_n^p}; \quad B_1 = \frac{M}{(Q_n^p)_1}$$

где  $M$  – тепловая мощность теплотехнической установки, МВт (кВт);

$B; B_1$  – расход основного и заменяемого топлива, кг/с ( $\text{м}^3/\text{с}$ );

$Q_n^p; (Q_n^p)_1$  – низшая теплота сгорания основного и заменяемого топлива,  $\text{кДж}/\text{м}^3$  ( $\text{МДж}/\text{м}^3$ ) для газообразного и  $\text{кДж}/\text{кг}$  ( $\text{МДж}/\text{кг}$ ) для твёрдых и жидких топлив.

- затем определить действительный расход воздуха и количество продуктов сгорания на работающем топливе по следующим формулам,  $\text{м}^3/\text{с}$  ( $\text{м}^3/\text{ч}$ ):

$$V_B = V_B^0 \cdot \alpha \cdot V^T; V_{п.г} = V_{п.г}^0 \cdot \alpha \cdot V^T \text{ или } V_B = V_B^0 \cdot \alpha \cdot B; V_{п.г} = V_{п.г}^0 \cdot \alpha \cdot B$$

Аналогично определить расход воздуха и полученное количество продуктов сгорания при заменяемом топливе ( $B_1, V_1^T$ ) по формулам:

$$V_{B1} = V_B^0 \cdot \alpha \cdot V_1^T; V_{п.г1} = V_{п.г}^0 \cdot \alpha \cdot V_1^T \text{ или } V_{B1} = V_B^0 \cdot \alpha \cdot B_1; V_{п.г1} = V_{п.г}^0 \cdot \alpha \cdot B_1$$

где  $V_B^0, V_{п.г}^0$  - теоретически необходимое количество воздуха и продуктов сгорания при  $\alpha = 1,0$  из расчётов горения топлива,  $\text{м}^3 \text{в-ха}/\text{м}^3 \text{газа}$  ( $\text{м}^3_{п.г}/\text{м}^3 \text{газа}$ );

$$V^T, V_1^T, B, B_1 - \text{расход основного и заменяемого топлива, } \text{м}^3/\text{с} \text{ (кг/с)}.$$

Потом сравнить действительные расходы воздуха на одном и другом топливе. Если окажется что расход воздуха при работе на новом топливе больше расхода воздуха на замененном топливе, необходимо решить вопрос сможет ли существующий вентилятор, обеспечить такое количество воздуха. Если нет, то необходимо выбрать новый вентилятор по производительности и по создаваемому напору с учётом запаса 10-20% по этим параметрам, т.е полученный расход воздуха на новом топливе увеличивается на 20%. Затем разработать схему подачи воздуха с указанием длин участков и диаметров воздухопроводов и определяем аэродинамическое сопротивление воздушного тракта. После этого выбираем новый вентилятор по производительности и по аэродинамическому сопротивлению воздушного тракта, которое также увеличивается на 10-20%.

Аналогично поступаем и с выбором дымососа, только сравнивать будем количество дымовых газов при работе на одном и другом виде топлива. При расчётах аэродинамического сопротивления воздушного тракта скорость воздуха принять  $W_b = 10-12 \text{ м/с}$ , а при определении аэродинамического сопротивления



дымового тракта скорость дыма принять  $W_d = 3$  м/с. Однако, можно и не выбирать дымосос и вентилятор, а осуществить обогащение воздуха до определённого предела, который определяется [31, с 107]. В случае выбора вентилятора и дымососа необходимо:

- произвести выбор газогорелочного устройства по работе [9,11], который производят в следующей последовательности, определяем количество горелок, предварительно приняв  $Q_G$  (производительность горелки МВт (кВт)), тогда количество их, шт:

$$n = \frac{M}{Q_G} \quad \text{или} \quad n = \frac{V_G}{W_G \cdot 0,785 \cdot d^2 \cdot \varepsilon},$$

где  $V_G$  - суммарный расход газа на горелки, м<sup>3</sup>/с;

$W_G$  - скорость истечения газа из сопла горелки, м/с;

$d$  - диаметр газового сопла (отверстия), м;

$\varepsilon$  - коэффициент сжатия струи.