

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

---

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Пензенский государственный университет  
архитектуры и строительства»  
(ПГУАС)

**С.Г. Прохоров, А.А. Кожунов**

## **СЖИГАНИЕ ГАЗА В КОММУНАЛЬНО-БЫТОВЫХ УСТАНОВКАХ**

Под общей редакцией доктора технических наук,  
профессора Ю.П. Скачкова

Рекомендовано Редсоветом университета  
в качестве учебного пособия для студентов, обучающихся  
по направлениям 08.03.01, 08.04.01 «Строительство»

Пенза 2014

УДК 696.2 (075.8)

ББК 38.763

П 84

*Учебное пособие подготовлено в рамках проекта  
«ПГУАС – региональный центр повышения качества подготовки  
высококвалифицированных кадров для строительной отрасли»  
(конкурс Министерства образования и науки Российской Федерации –  
«Кадры для регионов»)*

Рецензенты: кандидат технических наук, доцент кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция» ПГУАС Н.В. Аржаева;  
ГИП ООО «Тепло-Газ» О.А. Елисеева  
(г. Заречный Пензенской области)

### **Прохоров С.Г.**

П84 Сжигание газа в коммунально-бытовых установках: учеб. пособие / С.Г. Прохоров, А.А. Кожунов; под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. Ю.П. Скачкова. – Пенза: ПГУАС, 2014. – 132 с.

Изложены основные сведения по сжиганию газа в коммунально-бытовых установках.

Учебное пособие направлено на формирование способностей осознания основных проблем своей предметной области, при решении которых возникает необходимость в сложных задачах выбора, требующих использования количественных и качественных методов.

Учебное пособие подготовлено на кафедре теплогазоснабжения и вентиляции и базовой кафедре ПГУАС при ООО «Гипромаш» и предназначено для использования студентами, обучающимися по направлениям 08.03.01, 08.04.01 «Строительство».

© Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, 2014  
© Прохоров С.Г., Кожунов А.А., 2014

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Рациональное, эффективное и безопасное сжигание газового топлива – одна из актуальных проблем в области газоснабжения. Особенно это относится к коммунально-бытовым установкам – наиболее распространенному виду газоиспользующего оборудования.

Настоящее учебное пособие освещает базовые вопросы сжигания газа. В нем приведены требования к газовому топливу для коммунально-бытового потребления. Изложены теоретические основы горения газов. Даны основные сведения по газовым горелкам, а также рассмотрены конструкции горелок на характерных примерах, методы оценки эффективности и вопросы практики сжигания газа.

Материал пособия опирается на учебную, справочную литературу и действующую нормативную базу.

Пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлениям 08.03.01, 08.04.01 «Строительство» с целью более полного обеспечения самостоятельной работы в контексте рейтинговой системы оценки знаний и навыков.

Авторы выражают благодарность кандидату технических наук, доценту Н.В. Аржаевой и инженеру О.А. Елисеевой за внимательное рецензирование рукописи.

Авторы с благодарностью примут все отзывы, замечания, пожелания от заинтересованных читателей, которые можно направлять по адресу: 440028, г. Пенза, ул. Г. Титова, 28, корпус 2, кафедра «Теплогазоснабжение и вентиляция».

## ВВЕДЕНИЕ

Газ является наиболее эффективным и экологически чистым видом топлива. В ближайшие 100 лет он будет иметь важное значение в энергетике, промышленности и коммунально-бытовом секторе страны.

Основные принципы государственной политики в области газоснабжения в Российской Федерации:

- государственная поддержка развития газоснабжения в целях улучшения социально-экономических условий жизни населения, обеспечения условий для развития экономики с учетом промышленной и экономической безопасности;

- государственное регулирование рационального использования запасов газа, особенно запасов, имеющих стратегическое значение;

- повышение уровня газификации жилищно-коммунального хозяйства, промышленных и иных организаций, расположенных на территориях субъектов Российской Федерации, на основе формирования и реализации соответствующих федеральной, межрегиональных и региональных программ газификации;

- определение основ ценовой политики в отношении газа;

- обеспечение надежной сырьевой базы добычи газа;

- обеспечение энергетической безопасности Российской Федерации.

Федеральная система газоснабжения – совокупность действующих на территории Российской Федерации систем газоснабжения: Единой системы газоснабжения, региональных систем газоснабжения, газораспределительных систем и независимых организаций. Федеральная система газоснабжения является одной из федеральных энергетических систем Российской Федерации. Её деятельность регулируется государством в порядке, установленном законодательством Российской Федерации.

Развитие газификации территорий Российской Федерации осуществляется на основании перспективного баланса добычи и потребления газа, а также принятых в установленном порядке федеральной, межрегиональных и региональных программ газификации жилищно-коммунального хозяйства, промышленных и иных организаций.

Преимущественное право на заключение договоров поставки газа имеют покупатели для государственных нужд, коммунально-бытовых и социальных нужд граждан, а также его покупатели, в отношении которых продлеваются действующие договоры поставки газа. Поставки газа потребителям осуществляются только при соответствии качества поставляемого газа государственным стандартам и при наличии сертификатов соответствия.

Преимущества газового топлива по сравнению с другими видами топлива (высокие энергетические свойства, относительная чистота продуктов сгорания, высокий КПД, улучшение труда и быта, повышение качества продукции и т.д.) обусловили его широкое применение в коммунально-бытовых установках. При этом задача рационального и эффективного сжигания газового топлива становится более актуальной в контексте принятого законодательства в области энергоэффективности и энергосбережения.

# 1. ГОРЮЧИЕ ГАЗЫ ДЛЯ КОММУНАЛЬНО-БЫТОВОГО ПОТРЕБЛЕНИЯ

## 1.1. Общая характеристика

Газообразное топливо – это смесь горючих и негорючих компонентов и примесей. К горючим компонентам относят углеводороды, водород и оксид углерода. К негорючим – азот, кислород, диоксид углерода. К примесям относят сероводород, водяной пар, механические примеси.

Природные газы газовых месторождений однородны по составу и состоят в основном из метана. Попутные газы нефтяных месторождений содержат также этан, пропан, бутан.

Сжиженные газы являются смесью пропана и бутана, а получаемые на нефтеперерабатывающих заводах при термической переработке нефти также содержат этилен, пропилен и бутилен.

Нормальная работа газосжигающих установок зависит от состава газа и содержания в нем примесей. Поэтому установлены определенные требования к качеству топливных газов коммунально-бытового потребления.

## 1.2. Требования к качеству природных газов

Природные газы, предназначенные как топливо для промышленного и коммунально-бытового использования, должны соответствовать требованиям и нормам, приведенным в табл. 1.1.

Т а б л и ц а 1 . 1

Наименование показателя	Норма
1. Теплота сгорания низшая, МДж/м <sup>3</sup> (ккал/м <sup>3</sup> ), при 20 °С и 101,325кПа, не менее	31,8 (7600)
2. Область значений числа Воббе (высшего), МДж/м <sup>3</sup> (ккал/м <sup>3</sup> )	41,2...54,5 (9850...13000)
3. Допустимое отклонение числа Воббе от номинального значения, %, не более	± 5
4. Массовая концентрация сероводорода, г/м <sup>3</sup> , не более	0,02
5. Массовая концентрация меркаптановой серы, г/м <sup>3</sup> , не более	0,036
6. Объемная доля кислорода, %, не более	1,0
7. Масса механических примесей в 1 м <sup>3</sup> , г, не более	0,001
8. Интенсивность запаха газа при объемной доле 1 % в воздухе, баллы, не менее	3

### П р и м е ч а н и я :

1. По согласованию с потребителем допускается подача газа для энергетических целей с более высоким содержанием сероводорода и меркаптановой серы по отдельным газопроводам.

2. Показатели по п.п. 2, 3, 8 распространяются только на газ для коммунально-бытового назначения. Для газа промышленного назначения показатель по п. 8 устанавливается по согласованию с потребителем.

3. Номинальное значение числа Воббе устанавливаются в пределах нормы показателя по п. 2 для отдельных газораспределительных систем по согласованию с потребителем.

Точка росы влаги в пункте сдачи должна быть ниже температуры газа.

Наличие в газе жидкой фазы воды и углеводородов не допускается.

Природный газ по токсикологической характеристике относится к веществам 4 класса опасности.

Природный газ относится к группе веществ, способных образовывать с воздухом взрывоопасные смеси. Концентрационные пределы воспламенения (по метану) в смеси с воздухом, объемные проценты: нижний – 5, верхний – 15.

### 1.3. Требования к качеству сжиженных газов

Углеводородные сжиженные газы должны изготавливаться в соответствии с требованиями ГОСТ 20448–90 по технологическому регламенту, утвержденному в установленном порядке.

В зависимости от содержания основного компонента марки сжиженного газа приведены в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Марка	Наименование
ПТ	Пропан технический
СПБТ	Смесь пропана и бутана технических
БТ	Бутан технический

По физико-химическим показателям сжиженный газ должен соответствовать требованиям и нормам, приведенным в табл. 1.3.

Таблица 1.3

Наименование показателя	Норма для марки		
	ПТ	СПБТ	БТ
1	2	3	4
1. Массовая доля компонентов, %:			
сумма метана, этана и этилена	Не нормируется		
сумма пропана и пропилена, не менее	75	Не нормируется	
сумма бутанов и бутиленов, не менее не более	Не нормируется	– 60	60
2. Объемная доля жидкого остатка при 20°C, %, не более	0,7	1,6	1,8

## Окончание табл. 1.3

1	2	3	4
3. Давление насыщенных паров, избыточное, МПа, при температуре: плюс 45 °С, не более минус 20 °С, не менее	1,6 0,16	1,6 –	1,6 –
4. Массовая доля сероводорода и меркаптановой серы, %, не более в том числе сероводорода, не более	0,013 0,003	0,013 0,003	0,013 0,003
5. Содержание свободной воды и щелочи	Отсутствие		
6. Интенсивность запаха, баллы, не менее	3	3	3

## Примечания:

1. По согласованию изготовителя с потребителем допускается вырабатывать газ марки СПБТ с массовой долей пропана и пропилена не менее 60 %.

2. При массовой доле меркаптановой серы в сжиженном газе 0,002 % и более допускается не определять интенсивность запаха. При массовой доле меркаптановой серы менее 0,002 % или интенсивности запаха менее 3 баллов сжиженные газы должны быть одорированы по методике, утвержденной в установленном порядке.

Сжиженный газ пожаро- и взрывоопасен, малотоксичен, имеет специфический характерный запах. По степени воздействия на организм газ относится к веществам 4 класса опасности.

Сжиженный газ образует с воздухом взрывоопасные смеси при концентрации паров пропана от 2,1 до 9,5 %, нормального бутана от 1,5 до 8,5 % (по объему) при давлении 98066 Па (1атм) и температуре 15–20 °С.

Сжиженный газ, попадая на тело человека, вызывает обморожение, напоминающее ожог.

Пары сжиженного газа могут скапливаться в низких и непроветриваемых местах.

Человек, находящийся в атмосфере с небольшим содержанием паров сжиженного газа в воздухе, испытывает кислородное голодание, а при значительных концентрациях в воздухе может погибнуть от удушья.

В производственных помещениях должны соблюдаться требования санитарной гигиены, помещения должны быть оборудованы приточно-вытяжной вентиляцией, обеспечивающей десятикратный воздухообмен в 1 час и чистоту воздуха рабочей зоны.

В помещениях производства, хранения и перекачивания сжиженного газа запрещается обращение с открытым огнем, искусственное освещение должно быть выполнено во взрывозащищенном варианте, все работы следует проводить инструментами, не дающими при ударе искру.

Сжиженный газ наливают в цистерны, металлические баллоны и другие емкости, освидетельствованные в соответствии с «Правилами устрой-

ства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением», утвержденными в установленном порядке.

Применение различных марок сжиженного газа для коммунально-бытового потребления в зависимости от макроклиматических районов страны представлено в табл. 1.4.

Т а б л и ц а 1 . 4

Система газоснабжения	Применяемый сжиженный газ для макроклиматического района по ГОСТ 16350			
	Умеренного		Холодного	
	Летний период	Зимний период	Летний период	Зимний период
Газобаллонная: – с наружной установкой баллонов – с внутриквартирной установкой баллонов; портативные баллоны	СПБТ СПБТ БТ	ПТ СПБТ БТ	СПБТ СПБТ БТ	ПТ СПБТ БТ
Групповые установки: – без испарителей – с испарителями	СПБТ СПБТ БТ	ПТ ПТ СПБТ БТ	ПТ СПБТ ПТ СПБТ	ПТ ПТ СПБТ

**П р и м е ч а н и я :**

1. Все районы, за исключением холодного и очень холодного: летний период – с 1 апреля по 1 октября; зимний период – с 1 октября по 1 апреля.
2. Холодный район: летний период – с 1 июня по 1 октября; зимний период – с 1 октября по 1 июня.
3. Очень холодный район: летний период – с 1 июня по 1 сентября; зимний период – с 1 сентября по 1 июня.

**Контрольные вопросы**

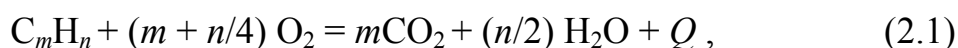
1. Какой нормативный документ определяет требования к природному газу промышленного и коммунально-бытового назначения?
2. Как нормируется теплота сгорания природного газа, используемого в качестве топлива?
3. Как нормируется содержание сероводорода в природном газе?
4. Объясните требования к содержанию кислорода в природном газе коммунально-бытового назначения.
5. Как нормируется интенсивность запаха природного газа?
6. Какой нормативный документ регламентирует требования к качеству сжиженного углеводородного газа для коммунально-бытового потребления?
7. Какие и в зависимости от чего бывают марки сжиженного углеводородного газа?



## 2. ГОРЕНИЕ ГАЗОВ

### 2.1. Реакции горения

Горением называют протекающую сравнительно быстро во времени химическую реакцию соединения горючих компонентов с кислородом, сопровождающуюся интенсивным выделением теплоты и резким повышением температуры продуктов сгорания. Реакции горения описываются стехиометрическими уравнениями, характеризующими качественно и количественно вступающие в реакцию и образующиеся в результате ее вещества. Общее уравнение реакции горения любого углеводорода



где  $m, n$  – число атомов углерода и водорода в молекуле;

$Q$  – тепловой эффект реакции, или теплота сгорания.

Реакции горения распространенных в практике газов приведены в табл. 2.1. Эти уравнения являются балансовыми и по ним нельзя судить ни о скорости реакции, ни о механизме химических превращений.

Тепловым эффектом, или теплотой сгорания  $Q$ , называют количество теплоты, которое выделяется при полном сгорании 1 кмоль, 1 кг или 1 м<sup>3</sup> газа при нормальных физических условиях. Различают высшую  $Q_v$  и низшую  $Q_n$  теплоту сгорания. Высшая теплота сгорания включает в себя теплоту, выделяющуюся при конденсации водяных паров в процессе горения. Практически при сжигании газа водяные пары, как правило, не конденсируются, а удаляются вместе с другими продуктами сгорания. Поэтому технические расчеты обычно ведут по низшей теплоте сгорания, т.е. без учета теплоты конденсации водяных паров, составляющей около 2400 кДж/кг\*

Высшая (и низшая) теплота сгорания газов, состоящих из нескольких компонентов,

$$Q = r_1Q_1 + r_2Q_2 + \dots + r_nQ_n, \quad (2.2)$$

где  $r_1, r_2, \dots, r_n$  – объемные (молярные, массовые) доли компонентов, входящих в смесь;

$Q_1, Q_2, \dots, Q_n$  – теплота сгорания компонентов.

---

\* КПД, рассчитанный по низшей теплоте сгорания, численно выше, чем по высшей теплоте сгорания, т.е. создается видимость относительного «благополучного» уровня использования газа. Расчеты КПД по высшей теплоте сгорания сразу более чем на 10% «ухудшают» показатели использования газа в стране. Однако именно это обстоятельство и убеждает в необходимости активно использовать теплоту конденсации водяных паров всевозможными техническими средствами.

Таблица 2.1

## Реакции горения и теплота сгорания сухих газов (при 0° С и 101,3 кПа)

Газ	Реакция горения	Молярная, МДж/ кмоль		Массовая, кДж/ кг		Объемная, кДж/м <sup>3</sup>	
		Высшая	Низшая	Высшая	Низшая	Высшая	Низшая
Водород	$H_2 + 0,5O_2 = H_2O$	286,06	242,9	141900	120080	12750	10790
Оксид углерода	$CO + 0,5O_2 = CO_2$	283,17	283,17	10090	10090	12640	12640
Метан	$CH_4 + 2O_2 = CO_2 + 2H_2O$	880,9	800,9	55546	49933	39820	35880
Этан	$C_2H_6 + 3,5O_2 = 2CO_2 + 3H_2O$	1560,9	1425,7	52019	47415	70310	64360
Пропан	$C_3H_8 + 5O_2 = 3CO_2 + 4H_2O$	2221,4	2041,4	50385	46302	101210	93180
<i>n</i> -Бутан	$C_4H_{10} + 6,5O_2 = 4CO_2 + 5H_2O$	2880,4	2655,0	51344	47327	133800	123570
Изобутан	$C_4H_{10} + 6,5O_2 = 4CO_2 + 5H_2O$	2873,5	2648,3	51222	47208	132960	122780
<i>n</i> -Пентан	$C_5H_{12} + 8O_2 = 5CO_2 + 6H_2O$	3539,1	3274,4	49052	45383	169270	156630
Этилен	$C_2H_4 + 3O_2 = 2CO_2 + 2H_2O$	1412,0	1333,5	50341	47540	63039	59532
Пропилен	$C_3H_6 + 4,5O_2 = 3CO_2 + 3H_2O$	2059,5	1937,4	48944	46042	91945	88493
Бутилен	$C_4H_8 + 6O_2 = 4CO_2 + 4H_2O$	2720	2549,7	48487	45450	121434	113830

Воспользовавшись табл. 2.1, высшую и низшую теплоту сгорания, кДж/м<sup>3</sup>, сложного газа можно определять по следующим формулам:

$$Q_B = 127,5 H_2 + 126,4 CO + 398 CH_4 + 703 C_2H_6 + \\ + 1012 C_3H_8 + 1338 C_4H_{10} + 1329 C_4H_{10} + 1693 C_5H_{12} + \\ + 630 C_2H_4 + 919 C_3H_6 + 1214 C_4H_8 \quad (2.3)$$

$$Q_H = 107,9 H_2 + 126,4 CO + 358,8 CH_4 + 643 C_2H_6 + \\ + 931,8 C_3H_8 + 1235 C_4H_{10} + 1227 C_4H_{10} + 1566 C_5H_{12} + \\ + 595 C_2H_4 + 884 C_3H_6 + 1138 C_4H_8, \quad (2.4)$$

где H<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub> и т.д. – содержание отдельных составляющих в газовом топливе, об. %.

Процесс горения протекает несравненно сложнее, чем по формуле (2.1), так как наряду с разветвлением цепей происходит их обрыв за счет образования промежуточных стабильных соединений. Эти соединения в зоне высоких температур претерпевают дальнейшие стадийные преобразования, приводящие при наличии кислорода к образованию конечных продуктов: водяного пара H<sub>2</sub>O и диоксида углерода CO<sub>2</sub>. При общем и местном недостатке окислителя и при вынужденном охлаждении зоны реакции, например при омывании пламенем холодного теплоприемника, промежуточные соединения могут стабилизироваться и совместно с продуктами завершеного горения попадать в окружающую среду.

Интенсивность выделения теплоты и рост температуры в течение реакции горения в свою очередь приводят к увеличению в реагирующей системе активных частиц. Такая взаимосвязь цепного реагирования и температуры, свойственная всем осуществляемым в практике процессам горения, привела к введению понятия цепочно-теплого взрыва. Под этим следует понимать, что сами химические реакции горения имеют цепной характер, а их ускорение происходит за счет выделения теплоты и роста температуры в реагирующей системе.

По закону действующих масс скорость любой химической реакции в гомогенной (однородной) смеси пропорциональна произведению концентраций реагирующих веществ. Для необратимой бимолекулярной реакции эта скорость

$$\omega = K C_1 C_2, \quad (2.5)$$

где C<sub>1</sub> и C<sub>2</sub> – концентрации реагирующих компонентов, кмоль/ м<sup>3</sup>;  
K – константа скорости реакции, зависящая от природы реагирующих веществ и температуры.

При сжигании газа концентрации реагирующих веществ можно условно считать неизменными, так как в зоне горения происходит непрерывный приток свежих компонентов однозначного состава.

Константа скорости реакции (по уравнению Аррениуса)

$$K = K_0 e^{-E/RT}, \quad (2.6)$$

где  $K_0$  – предэкспоненциальный множитель, принимаемый для стехиометрических гомогенных смесей,  $\approx 1,0$ ;

$E$  – энергия активации, кДж/кмоль;

$R$  – универсальная газовая постоянная, Дж/ (кг· К);

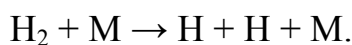
$T$  – абсолютная температура, К(°С);  $e$  – основание натуральных логарифмов.

Предэкспоненциальный множитель  $K_0$  можно трактовать как константу, характеризующую полноту столкновения молекул, энергию активации  $E$  – как минимальную энергию, необходимую для разрыва существующих связей молекул и образование активных частиц, обеспечивающих эффективность столкновения.

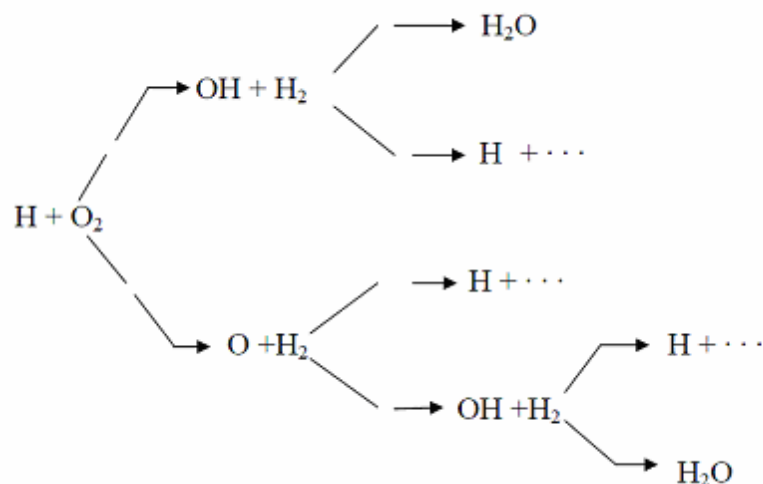
Эта энергия для распространенных в технике горючих смесей укладывается в пределы  $(80-150)10^3$  кДж/кмоль. Уравнение (2.6) показывает, что скорость химических реакций резко возрастает с увеличением температуры. Например, при повышении температуры с 500 до 1000 К скорость возрастает в зависимости от энергии активации в  $2 \cdot 10^4 \dots 5 \cdot 10^8$  раз.

Скорость реакций горения обусловлена также их разветвленным, цепным, характером. Эти реакции протекают через промежуточные химические активные частицы – атомы и радикалы, генерируемые самой реакцией, легко вступающие в соединения с исходными веществами и между собой, приводящие к образованию конечных продуктов и новых активных частиц, способных повторять ту же цепь реакций. Нарастающее самопроизвольное генерирование таких частиц приводит к разгону химических реакций и воспринимается как взрыв всей смеси.

Наиболее простой и изученной из разветвленных реакций является реакция взаимодействия водорода с кислородом. Зарождение цепи при этом связано с образованием атомарного водорода, возникающего, например, при столкновении молекул с нагретым телом – электрическая искра, пламя:



Дальнейшее протекание цепной реакции характеризуется схемой:



Итог единичного цикла

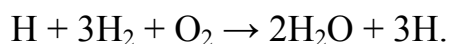
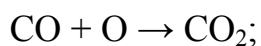
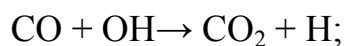
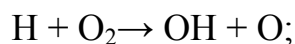
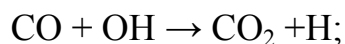
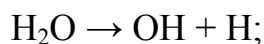


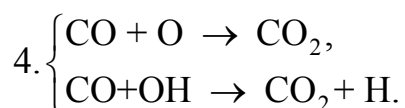
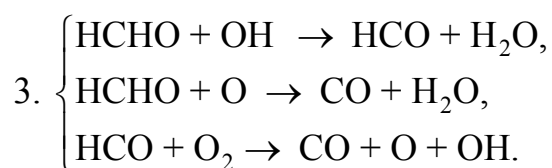
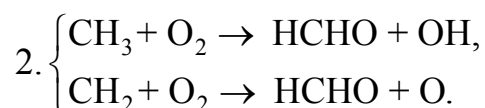
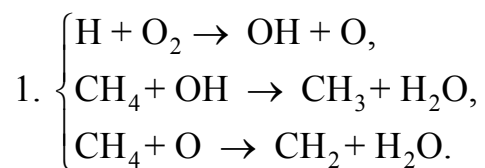
Схема и итог единичного цикла показывают, что вступление в реакцию одного атома водорода приводит к образованию двух молекул водяного пара и трех атомов водорода, каждый из которых может либо дать начало новой серии превращений, либо рекомбинироваться в стабильную молекулу  $\text{H} + \text{H} = \text{H}_2$ , замедляющую разветвление цепи.

Механизм взаимодействия оксида углерода с кислородом несколько сложнее и связан с сопутствующими, протекающими параллельно реакциями. Объясняется это тем, что сухая смесь оксида углерода с кислородом не реагирует до температуры  $700^\circ\text{C}$ , а выше ее протекает медленная гетерогенная (неоднородная) реакция по всему объему только при наличии в горючей смеси некоторого количества водяного пара:

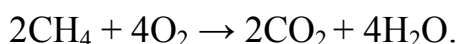


Механизм высокотемпературного горения углеводородов имеет еще более сложный цепной характер и связан с образованием активных частиц в виде атомов и радикалов, а также промежуточных молекулярных соеди-

нений. Самое схематичное представление о стадийном окислении простейшего углеводорода метана дают следующие реакции:

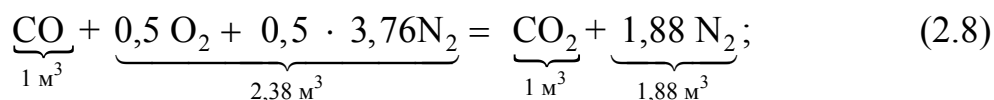
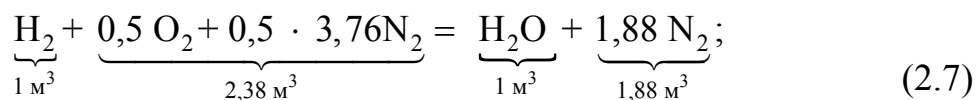


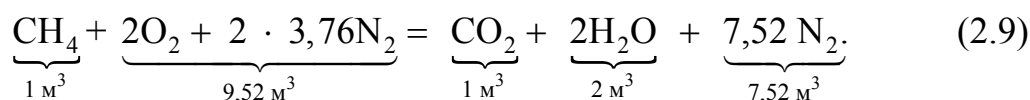
Итог единичного цикла



## 2.2. Расчеты горения

В практике сжигания газа кислород для горения подается с воздухом как его составная часть. Объемный состав, %, сухого воздуха для всех теплотехнических расчетов принимается следующим: кислород 21,0, азот – 79,0. Следовательно, 1 м<sup>3</sup> кислорода содержится в 100/21 = 4,76 м<sup>3</sup> воздуха, или на 1 м<sup>3</sup> кислорода приходится 79/21 = 3,76 м<sup>3</sup> азота. Если учесть, что 1 кмоль газа при нормальных условиях занимает примерно одинаковый объем, реакции горения газов в воздухе могут быть выражены следующими уравнениями:





Таким образом, приведенное выше уравнение (2.1) применительно к горению любого углеводорода в воздухе можно записать в виде



Потребности в кислороде и воздухе при горении различных газов, подсчитанные по приведенным в табл. 2.1 реакциям горения, представлены в табл. 2.2. Для сложного газа теоретический расход сухого воздуха  $V_T$ ,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ , может быть подсчитан по формуле, составленной на основании потребностей в кислороде отдельных компонентов, входящих в смесь:

$$V_T = 4,76/100 (0,5\text{H}_2 + 0,5\text{CO} + 2\text{CH}_4 + 3,5\text{C}_2\text{H}_6 + 5\text{C}_3\text{H}_8 + 6,5\text{C}_4\text{H}_{10} + 3\text{C}_2\text{H}_4 + 4,5\text{C}_3\text{H}_6 + 6\text{C}_4\text{H}_8 - \text{O}_2). \quad (2.10)$$

Теоретический расход влажного воздуха  $V_T^{\text{вл}}$ ,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ , больше определяемого по формуле (2.10) на объем содержащихся в нем водяных паров:

$$V_T^{\text{вл}} = V_T^{\text{o}} + 0,00124d_{\text{в}}V_T^{\text{o}}, \quad (2.11)$$

где  $d_{\text{в}}$  – влажность воздуха,  $\text{г}/\text{м}^3$ .

При неизвестном химическом составе газов, по известной низшей теплоте сгорания  $Q_{\text{н}}$ ,  $\text{кДж}/\text{м}^3$ , теоретический расход воздуха  $V_T$  (приближенно),  $\text{м}^3/\text{м}^3$ :

$$V_T = Q_{\text{н}}/3770. \quad (2.12)$$

Действительный расход воздуха  $V_{\text{в}}^{\text{д}}$ ,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ , вследствие несовершенства смешения горючего газа и окислителя в процессе горения принимается несколько больше теоретического:

$$V_{\text{в}}^{\text{д}} = V_T \alpha, \quad (2.13)$$

где  $\alpha$  – коэффициент избытка воздуха, который для практически применяемых горелок должен соответствовать требованиям ГОСТов. В реальных условиях при сжигании газа  $\alpha$  всегда должен быть больше 1, так как в противном случае неминуема химическая неполнота сгорания. Исключения составляют отдельные процессы, при которых необходимо создание в нагревательных камерах нейтральной или малоокислительной среды.

Состав и объем продуктов сгорания, подсчитанный по реакциям горения некоторых газов в сухом воздухе, приведены в табл. 2.2. Объем отдельных компонентов продуктов сгорания сложных газов,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ , при

сжигании их с избытком влажного воздуха может быть определен по следующим формулам:

$$V_{\text{CO}_2} = 0,01 (\text{CO} + \text{CO}_2 + \text{CH}_4 + 2\text{C}_2\text{H}_4 + \Sigma m\text{C}_m\text{H}_n); \quad (2.14)$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 0,01 [\text{H}_2 + 2\text{CH}_4 + 2\text{C}_2\text{H}_4 + \Sigma(n/2)\text{C}_m\text{H}_n] + 0,00124 (d_{\text{г}} + d_{\text{в}}\alpha V_{\text{т}}^{\text{с}}); \quad (2.15)$$

$$V_{\text{N}_2} = 0,79V_{\text{т}}^{\text{с}} + 0,01 \text{N}_2; \quad (2.16)$$

$$V_{\text{O}_2} = 0,21(\alpha - 1)V_{\text{т}}^{\text{с}}, \quad (2.17)$$

где CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, ..., C<sub>m</sub>H<sub>n</sub> – содержание отдельных компонентов в газе, об. %;

$d_{\text{г}}$  и  $d_{\text{в}}$  – влажность газа и воздуха, г/м<sup>3</sup>.

Суммарный объем влажных продуктов сгорания:

$$V_{\text{п.с}}^{\text{вл}} = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{O}_2}. \quad (2.18)$$

Т а б л и ц а 2.2

Теоретическая потребность в сухом кислороде и воздухе, м<sup>3</sup>, и объем продуктов сгорания газа при сжигании 1 м<sup>3</sup> газа при  $\alpha = 1,0$

Газ	Теоретическая потребность		Продукты сгорания			
	Кислорода	Воздуха	Диоксид углерода	Водяной пар	Азот	Всего
Водород H <sub>2</sub>	0,5	2,38	–	1,0	1,88	2,88
Оксид углерода CO	0,5	2,38	1,0	–	1,88	2,88
Метан CH <sub>4</sub>	2,0	9,52	1,0	2,0	7,52	10,52
Этан C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	3,5	16,66	2,0	3,0	13,16	18,16
Пропан C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	5,0	23,8	3,0	4,0	18,80	25,8
Бутан C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	6,5	30,94	4,0	5,0	24,44	33,44
Пентан C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	8,0	38,08	5,0	6,0	30,08	41,08
Этилен C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	3,0	14,28	2,0	2,0	11,28	15,28
Пропилен C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	4,5	21,42	3,0	3,0	16,92	22,92
Бутилен C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	6,0	28,56	4,0	4,0	22,56	30,56
Пентилен C <sub>5</sub> H <sub>10</sub>	7,5	35,7	5,0	5,0	28,20	38,20
Ацетилен C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	2,5	11,9	2,0	1,0	9,40	12,40

### 2.3. Температура горения

Различают следующие температуры горения газов: жаропроизводительность, калориметрическую, теоретическую и действительную (расчетную).



Жаропроизводительность  $t_{ж}$  – максимальная температура продуктов полного сгорания газа в адиабатических условиях с коэффициентом избытка воздуха  $\alpha = 1,0$  и при температуре газа и воздуха, равной  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ :

$$t_{ж} = Q_{н}^p / \sum V c_p, \quad (2.19)$$

где  $\sum(V \cdot c_p)$  – сумма произведений объемов и теплоемкостей компонентов продуктов полного сгорания  $1\text{ м}^3$  газа без избытка воздуха, или в развернутом виде

$$t_{ж} = Q_{н}^p / (V_{\text{CO}_2} c_{p\text{CO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} c_{p\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{N}_2} c_{p\text{N}_2}), \quad (2.19a)$$

где  $Q_{н}^p$  – низшая теплота сгорания газа,  $\text{кДж}/\text{м}^3$ ;  
 $V_{\text{CO}_2}, V_{\text{H}_2\text{O}}, V_{\text{N}_2}$  – объем диоксида углерода, водяного пара и азота, образовавшихся при сгорании  $1\text{ м}^3$  газа,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ;  
 $c_{p\text{CO}_2}, c_{p\text{H}_2\text{O}}, c_{p\text{N}_2}$  – средняя объемная теплоемкость при постоянном давлении  $\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}$  и  $\text{N}_2$  в пределах температур от  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $t_{ж}$ ,  $\text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot ^{\circ}\text{C})$ .

Жаропроизводительность горючих газов определяют методом последовательных приближений, так как теплоемкость газов непостоянна и увеличивается с повышением температуры (табл. 2.3).

Жаропроизводительность распространенных простых и сложных газов при их горении в сухом воздухе приведена в табл. 2.4. При сжигании газа в атмосферном воздухе, содержащем около 1 вес. % влаги, жаропроизводительность снижается на  $25\text{--}30\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

К а л о р и м е т р и ч е с к а я т е м п е р а т у р а г о р е н и я  $t_{к}$  – температура, которая определяется без учета диссоциации водяных паров и диоксида углерода, но с учетом фактической начальной температуры газа и воздуха. Она отличается от жаропроизводительности  $t_{ж}$  тем, что температура газа и воздуха, а также коэффициент избытка воздуха  $\alpha$  принимаются по их действительным значениям. Определить  $t_{к}$ ,  $^{\circ}\text{C}$ , можно по формуле

$$t_{к} = (Q_{н}^p + q_{\text{физ}}) / \sum V c_p \quad (2.20)$$

или

$$t_{к} = (Q_{н}^p + V_{\text{в}} c_{p\text{в}} t_{\text{в}} + c_{p\text{г}} t_{\text{г}}) / (V_{\text{CO}_2} c_{p\text{CO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} c_{p\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{N}_2} c_{p\text{N}_2} + V_{\text{O}_2} c_{p\text{O}_2}) \quad (2.20a)$$

где  $q_{\text{физ}}$  – теплосодержание (физическая теплота) газа и воздуха, отсчитываемое от  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\text{кДж}/\text{м}^3$ .

Таблица 2.3

Средняя объемная теплоемкость газов, кДж/ (м<sup>3</sup>·°С)

Температура, °С	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CO	CH <sub>4</sub>	H <sub>2</sub>	Водяные пары (H <sub>2</sub> O)	Воздух	
								сухой	влажный на 1 м <sup>3</sup> сухого газа
0	1,5981	1,2970	1,3087	1,3062	1,5708	1,2852	1,4990	1,2991	1,3230
100	1,7186	1,2991	1,3209	1,3062	1,6590	1,2978	1,5103	1,3045	1,3285
200	1,8018	1,3045	1,3398	1,3146	1,7724	1,3020	1,5207	1,3142	1,3360
300	1,8770	1,3112	1,3608	1,3230	1,8984	1,3062	1,5473	1,3217	1,3465
400	1,9858	1,3213	1,3822	1,3356	2,0286	1,3104	1,5704	1,3335	1,3587
500	2,0030	1,3327	1,4024	1,3482	2,1504	1,3104	1,5943	1,3469	1,3787
600	2,0559	1,3453	1,4217	1,3650	2,2764	1,3146	1,6195	1,3612	1,3873
700	2,1034	1,3587	1,4549	1,3776	2,3898	1,3188	1,6464	1,3755	1,4020
800	2,1462	1,3717	1,4549	1,3944	2,5032	1,3230	1,6737	1,3889	1,4158
900	2,1857	1,3857	1,4692	1,4070	2,6040	1,3314	1,7010	1,4020	1,4293
1000	2,2210	1,3965	1,4822	1,4196	2,7048	1,3356	1,7283	1,4141	1,4419
1100	2,2525	1,4087	1,4902	1,4322	2,7930	1,3398	1,7556	1,4263	1,4545
1200	2,2819	1,4196	1,5063	1,4448	2,8812	1,3482	1,7825	1,4372	1,4658
1300	2,3079	1,4305	1,5154	1,4532	—	1,3566	1,8085	1,4482	1,4771
1400	2,3323	1,4406	1,5250	1,4658	—	1,3650	1,8341	1,4582	1,4876
1500	2,3545	1,4503	1,5343	1,4742	—	1,3818	1,8585	1,4675	1,4973
1600	2,3751	1,4587	1,5427	—	—	—	1,8824	1,4763	1,5065
1700	2,3944	1,4671	1,5511	—	—	—	1,9055	1,4843	1,5149
1800	2,4125	1,4746	1,5590	—	—	—	1,9278	1,4918	1,5225
1900	2,4289	1,4822	1,5666	—	—	—	1,9498	1,4994	1,5305
2000	2,4494	1,4889	1,5737	1,5078	—	—	1,9694	1,5376	1,5376
2100	2,4591	1,4952	1,5809	—	—	—	1,9891	—	—
2200	2,4725	1,5011	1,5943	—	—	—	2,0252	—	—
2300	2,4860	1,5070	1,5943	—	—	—	2,0252	—	—
2400	2,4977	1,5166	1,6002	—	—	—	2,0389	—	—
2500	2,5091	1,5175	1,6045	—	—	—	2,0593	—	—

Таблица 2.4

## Жаропрочность газов в сухом воздухе

Простой газ	Жаропрочность, °С	Сложный газ усредненного состава	Приближенная жаропрочность, °С
Водород	2235	Природный газовых месторождений	2040
Оксид углерода	2370	То же, нефтяных месторождений	2080
Метан	2043	Коксовый	2120
Этан	2097	Высокотемпературной перегонки сланцев	1980
Пропан	2110	Парокислородного дутья под давлением	2050
Бутан	2118	Генераторный из жирных углей	1750
Пентан	2119	То же, паровоздушного дутья из тощих топлив	1670
Этилен	2284	Сжиженный (50 % C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> + 50 % C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> )	2115
Пропилен	2224	Водяной	2210
Бутилен	2203		
Пентилен	2189		
Ацетилен	2620		

Природные и сжиженные углеводородные газы перед сжиганием обычно не нагревают, и их объем по сравнению с объемом воздуха, идущего на горение, невелик. Поэтому при определении калориметрической температуры теплосодержание газов можно не учитывать. При сжигании газов с низкой теплотой сгорания (генераторные, доменные и др.) их теплосодержание (в особенности нагретых до сжигания) оказывает весьма существенное влияние на калориметрическую температуру.

Зависимость калориметрической температуры природного газа среднего состава ( $\text{CH}_4 - 97$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6 - 2$ ,  $\text{C}_3\text{H}_8$  и  $\text{C}_4\text{H}_{10} - 0,5$  и  $\text{CO}_2 - 0,5$  об. %) при сжигании в воздухе с температурой  $0^\circ\text{C}$  и влажностью 1 % от коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  приведена в табл. 2.5. Аналогичные данные для сжиженного углеводородного газа (технического пропана) при его сжигании в сухом воздухе приведены в табл. 2.7. Данными табл. 2.5 – 2.7 можно с достаточной точностью руководствоваться при установлении калориметрической температуры горения других природных газов, сравнительно близких по составу, и углеводородных газов практически любого состава. В случае необходимости получить высокую температуру в топочных объемах при сжигании газов с малыми коэффициентами избытка воздуха, а также для повышения КПД на практике прибегают к подогреву воздуха, что приводит к росту калориметрической температуры (см. табл. 2.6).

Т а б л и ц а 2 . 5

Калориметрическая и теоретическая температуры горения природного газа в воздухе с  $t = 0^\circ\text{C}$  и влажностью 1 %\* в зависимости от коэффициента избытка воздуха  $\alpha$

Коэффициент избытка воздуха $\alpha$	Калориметрическая температура горения $t_k, ^\circ\text{C}$	Теоретическая температура горения $t_T, ^\circ\text{C}$	Коэффициент избытка воздуха $\alpha$	Калориметрическая температура горения $t_k, ^\circ\text{C}$
1,0	2010	1920	1,33	1620
1,02	1990	1900	1,36	1600
1,03	1970	1880	1,40	1570
1,05	1940	1870	1,43	1540
1,06	1920	1860	1,46	1510
1,08	1900	1850	1,50	1470
1,10	1880	1840	1,53	1440
1,12	1850	1820	1,57	1410
1,14	1820	1790	1,61	1380
1,16	1800	1770	1,66	1350
1,18	1780	1760	1,71	1320
1,20	1760	1750	1,76	1290
1,22	1730	—	1,82	1260
1,25	1700	—	1,87	1230
1,28	1670	—	1,94	1200
1,30	1650	—	2,00	1170

\*Для сухого воздуха приведенные значения следует увеличить на  $25 - 30^\circ\text{C}$ .

Т а б л и ц а 2 . 6

Калориметрическая температура горения природного газа  $t_k$ , °С,  
в зависимости от коэффициента избытка сухого воздуха и его температуры  
(округленные значения)

Коэффициент избытка воздуха $\alpha$	Температура сухого воздуха, °С								
	20	100	200	300	400	500	600	700	800
0,5	1380	1430	1500	1545	1620	1680	1740	1810	1860
0,6	1610	1650	1715	1780	1840	1900	1960	2015	2150
0,7	1730	1780	1840	1915	1970	2040	2100	2200	2250
0,8	1880	1940	2010	2060	2130	2200	2260	2330	2390
0,9	1980	2030	2090	2150	2220	2290	2360	2420	2500
1,0	2050	2120	2200	2250	2320	2385	2450	2510	2560
1,2	1810	1860	1930	2000	2070	2140	2200	2280	2350
1,4	1610	1660	1740	1800	1870	1950	2030	2100	2160
1,6	1450	1510	1560	1640	1730	1800	1860	1950	2030
1,8	1320	1370	1460	1520	1590	1670	1740	1830	1920
2,0	1220	1270	1360	1420	1490	1570	1640	1720	1820

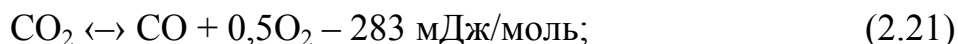
Т а б л и ц а 2 . 7

Калориметрическая температура горения  $t_k$  технического пропана  
в сухом воздухе\* с  $t = 0$  °С в зависимости  
от коэффициента избытка воздуха  $\alpha$

Коэффициент избытка воздуха $\alpha$	Калориметрическая температура горения $t_k$ , °С	Коэффициент избытка воздуха $\alpha$	Калориметрическая температура горения $t_k$ , °С
1,0	2110	1,45	1580
1,02	2080	1,48	1560
1,04	2050	1,50	1540
1,05	2030	1,55	1500
1,07	2010	1,60	1470
1,10	1970	1,65	1430
1,12	1950	1,70	1390
1,15	1910	1,75	1360
1,20	1840	1,80	1340
1,25	1780	1,85	1300
1,27	1750	1,90	1270
1,30	1730	1,95	1240
1,35	1670	2,00	1210
1,40	1630	2,10	1170

\*При сжигании пропана в атмосферном воздухе, содержащем около 1 вес. % влаги, калориметрическая температура горения снижается на 25 – 30 °С.

Теоретическая температура горения  $t_T$  – максимальная температура, которая определяется аналогично калориметрической  $t_K$ , но с поправкой на эндотермические (т.е. требующие теплоты) реакции диссоциации диоксида углерода и водяного пара, идущие с увеличением объема:



При высоких температурах диссоциация может пойти и дальше, до образования атомарных водорода, кислорода и в особенности гидроксильной группы. Кроме того, при сжигании газа всегда образуется некоторое количество оксидов азота. Все эти реакции эндотермичны и приводят к снижению температуры горения.

Теоретическая температура горения может быть определена по следующей формуле

$$t_T = \left( Q_H^p + q_{\text{физ}} - q_{\text{дис}} \right) / \sum V'c'_p, \quad (2.23)$$

где  $q_{\text{дис}}$  – суммарные затраты теплоты на диссоциацию  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  в продуктах сгорания, кДж/м<sup>3</sup>;

$\sum V'c'_p$  – сумма произведения объема и средней теплоемкости продуктов сгорания с учетом диссоциации на 1 м<sup>3</sup> газа.

Расчеты, связанные с установлением точных затрат на все процессы диссоциации, весьма сложны. Поэтому теоретическая температура обычно определяется не только по упрощенной формуле (2.23), но и по упрощенной развернутой:

$$t_T = \frac{Q_H^p + V_B c_{pB} t_B + c_{pT} t_T - (100aV_{\text{H}_2\text{O}} + 120bV_{\text{CO}_2})}{V_{\text{CO}_2} c_{p\text{CO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} c_{p\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{N}_2} c_{p\text{N}_2} + V_{\text{O}_2} c_{p\text{O}_2}}, \quad (2.23a)$$

где  $a$  и  $b$  – степень диссоциации водяного пара и диоксида углерода, об. % от исходного количества, которая возрастает с повышением температуры и снижением их парциального давления в смеси продуктов сгорания.

Как видно из табл. 2.8, при температуре до 1600 °С степень диссоциации ничтожна и может не учитываться, т.е. теоретическая температура горения может приниматься равной калориметрической.

Таблица 2.8

Степень диссоциации водяного пара  $H_2O$  и диоксида углерода  $CO_2$  в зависимости от парциального давления

Температура, °C	Парциальное давление, МПа											
	0,004	0,006	0,008	0,01	0,012	0,014	0,016	0,018	0,020	0,025	0,030	0,040
Водяной пар $H_2O$												
1600	0,85	0,75	0,65	0,6	0,58	0,56	0,54	0,52	0,50	0,48	0,46	0,42
1700	1,45	1,27	1,16	1,08	1,02	0,95	0,90	0,85	0,8	0,76	0,73	0,67
1800	2,40	2,10	1,9	1,8	1,70	1,6	1,53	1,46	1,4	1,30	1,25	1,15
1900	4,05	3,60	3,25	3,0	2,85	2,70	2,65	2,50	2,40	2,20	2,10	1,9
2000	5,75	5,05	4,60	4,30	4,0	3,80	3,55	3,50	3,40	3,15	2,95	2,65
2100	8,55	7,50	6,80	6,35	6,0	5,70	5,45	5,25	5,10	4,80	4,55	4,10
2200	12,3	10,8	9,90	9,30	8,80	8,35	7,95	7,65	7,40	6,90	6,50	5,90
2300	16,0	15,0	13,7	12,9	12,2	11,6	11,1	10,7	10,4	9,6	9,1	8,4
2400	22,5	20,0	18,4	17,2	16,3	15,6	15,0	14,4	13,9	13,0	12,2	11,2
2500	28,5	25,6	23,5	22,1	20,9	20,0	19,3	18,6	18,0	16,8	15,9	14,6
3000	70,6	66,7	63,8	61,6	59,6	58,0	56,5	55,4	54,3	51,9	50,0	47,0
Диоксид углерода $CO_2$												
1500	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
1600	2,0	1,8	1,6	1,5	1,45	1,4	1,35	1,3	1,25	1,2	1,1	1,1
1700	3,8	3,3	3,0	2,8	2,6	2,5	2,4	2,3	2,2	2,0	1,9	1,9
1800	6,3	5,5	5,0	4,6	4,4	4,2	4,0	3,8	3,7	3,5	3,3	3,3
1900	10,1	8,9	8,1	7,6	7,2	6,8	6,5	6,3	6,1	5,6	5,3	5,3
2000	16,5	14,6	13,4	12,5	11,8	11,2	10,8	10,4	10,0	9,4	8,8	8,8
2100	23,9	21,3	19,6	18,3	17,3	16,5	15,9	15,3	14,9	13,9	13,1	13,1
2200	35,1	31,5	29,2	27,5	26,1	25,0	24,1	23,3	22,6	21,2	20,1	20,1
2300	44,7	40,7	37,9	35,9	34,3	32,9	31,8	30,9	30,0	28,2	26,9	26,9
2400	56,0	51,8	48,8	46,5	44,6	43,1	41,8	40,6	39,6	37,5	35,8	35,8
2500	66,3	62,2	59,3	56,9	55,0	53,4	52,0	50,7	49,7	47,3	45,4	45,4
3000	94,9	93,9	93,1	92,3	91,7	90,6	90,1	89,6	88,5	87,6	86,8	86,8

Действительная (расчетная) температура продуктов сгорания  $t_d$  – температура, которая достигается в реальных условиях в самой горячей точке факела. Она ниже теоретической и зависит от потерь теплоты в окружающую среду, степени отдачи теплоты из зоны горения излучением, растянутости процесса горения во времени и др. Действительные усредненные температуры в топках печей и котлов определяются по тепловому балансу или приближенно по теоретической или калориметрической температуре горения в зависимости от температуры в топках с введением в них экспериментально установленных поправочных коэффициентов:

$$t_d = t_r \eta, \quad (2.24)$$

где  $\eta$  – пирометрический коэффициент, укладываемый в следующие пределы: для качественно выполненных термических и нагревательных печей с теплоизоляцией 0,75–0,85; для герметичных печей без теплоизоляции 0,70–0,75; для экранированных топок котлов 0,60–0,75.

В практике сжигания газа необходимо знать не только приведенные выше адиабатные температуры горения, но и максимальные температуры, возникающие в пламени. Приближенные значения последних обычно устанавливают экспериментально с помощью платино-платинородиевых термомпар, а для более точного определения используют метод обращения линий натрия. Сущность метода сводится к тому, что пламя подкрашивают, вводя в него небольшое количество хлористого натрия в виде тумана, в результате чего в зоне высоких температур за счет диссоциации возникают атомы натрия и другие продукты. С помощью спектрографа по яркости окрашенных линий натрия и определяют температуру горения. Максимальные температуры, возникающие в свободном пламени на расстоянии 5–10 мм от вершины конусного фронта горения и определенные этим методом, следующие, °С:

	Для газовой смеси, близкой по составу к стехиометрической	Для газокислородной смеси
H <sub>2</sub>	2045	2660
CO	2100	2920
CH <sub>4</sub>	1870	2740
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	1890	–
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	1920	2780
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	1890	–
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	2320	3000

Приведенные данные показывают, что максимальные температуры в пламени меньше жаропродуктивности соответствующих газов, что объясняется наличием процессов диссоциации H<sub>2</sub>O и CO<sub>2</sub> и отводом теплоты из пламенной зоны.



## 2.4. Температура самовоспламенения

Для того чтобы могли протекать реакции горения, необходимо создать условия для воспламенения смеси топлива с окислителем. Воспламенение может быть самопроизвольным и вынужденным (зажигание).

Под температурой самовоспламенения понимается минимальная температура, до которой должна быть нагрета газоздушная смесь и при которой начинается самопроизвольный процесс горения, т.е. без внешнего подвода теплоты, за счет выделения теплоты горящими частицами газа. Она определяется различными способами, основным из которых является метод выпуска заранее приготовленной газоздушной смеси в вакуумированный сосуд, нагреваемый в электрической печи. Повышая постоянно температуру сосуда, находят то ее минимальное значение, при котором наблюдается появление пламени, т.е. самовоспламенение смеси. Отмеченная при этом температура и отождествляется с температурой самовоспламенения исследуемого газа.

Температура самовоспламенения не является строго фиксированной для данного газа и зависит от его содержания в газоздушной смеси, степени однородности последней, формы и размеров сосуда, в котором смесь нагревается, быстроты и способа ее нагрева, каталитического влияния стенок сосуда и давления, под которым находится смесь. Так как учесть влияние различных факторов, в особенности при их совместном воздействии, весьма трудно, то в практике, в частности при оценке взрывоопасности, целесообразно ориентироваться на наименьшую температуру самовоспламенения, полученную при экспериментах (табл. 2.9).

Температуры самовоспламенения горючих газов в кислороде, как правило, несколько ниже, чем в воздухе. Введение в состав газов балластных примесей (азота и диоксида углерода) приводит к увеличению температуры самовоспламенения. Присутствие в сложных газах компонентов с низкой температурой самовоспламенения приводит к снижению температуры самовоспламенения смеси.

Т а б л и ц а 2 . 9

Наименьшие измеренные температуры самовоспламенения некоторых газов и паров в смеси с воздухом при атмосферном давлении

Газ	Температура самовоспламенения, °С	Газ	Температура самовоспламенения, °С
Водород	530	Этилен	455
Оксид углерода	610	Пропилен	455
Метан	650	Бутилен	455
Этан	510	Ацетилен	335
Пропан	500	Сероводород	290
Бутан	429	Коксовый газ	560

Как указывалось выше, вынужденное воспламенение газов (зажигание) осуществляется поджиганием смеси в одной точке или в ряде точек высокотемпературным источником, открытым пламенем или электрической искрой в точке вылета газа или газовой смеси из огневых каналов горелок в топочный объем. Таким образом, зажигание отличается от самовоспламенения тем, что горючую смесь доводят до появления пламени не во всем объеме, а только в небольшой части его. Теплоотвод из нагреваемой зоны требует, чтобы интенсивность тепловыделения источника зажигания превышала этот отвод теплоты. После воспламенения источник зажигания удаляется, и горение происходит за счет распространения фронта пламени.

## 2.5. Пределы воспламеняемости и взрываемости

Газовоздушные смеси могут воспламеняться (взрываться) только в том случае, если содержание газа в смеси находится в определенных ( для каждого газа) пределах. В связи с этим различают нижний и верхний концентрационные пределы воспламеняемости. Нижний предел соответствует минимальному, а верхний – максимальному количеству газа в смеси, при котором происходят их воспламенение (при зажигании) и самопроизвольное (без притока тепла из вне) распространение пламени ( самовоспламенение). Эти же пределы соответствуют и условиям взрываемости газовоздушных смесей.

Если содержание газа в газовой смеси меньше нижнего предела воспламеняемости, такая смесь гореть и взрываться не может, поскольку выделяющейся вблизи источника зажигания теплоты для подогрева смеси до температуры воспламенения недостаточно. Если содержание газа в смеси находится между нижним и верхним пределами воспламеняемости, подожженная смесь воспламеняется и горит как вблизи источника зажигания, так и при удалении его. Такая смесь является взрывоопасной. Чем шире будет диапазон пределов воспламеняемости (называемых также пределами взрываемости) и ниже нижний предел, тем более взрывоопасен газ. И наконец, если содержание газа в смеси превышает верхний предел воспламеняемости, то количества воздуха в смеси недостаточно для сгорания газа.

Существование пределов воспламеняемости вызывается тепловыми потерями при горении. При разбавлении горючей смеси воздухом, кислородом или газом тепловые потери возрастают, скорость распространения пламени уменьшается, и горение прекращается после удаления источника зажигания.

Пределы воспламеняемости для распространенных газов в смесях с воздухом и кислородом приведены в табл. 2.10–2.11. С увеличением температуры смеси пределы воспламеняемости расширяются, а при температуре, превышающей температуру самовоспламенения, смеси газа с

воздухом или кислородом горят при любом объемном соотношении их. Пределы воспламеняемости зависят не только от видов горючих газов, но и от условий проведения экспериментов (емкости сосуда, тепловой мощности источника зажигания, температуры смеси, распространения пламени вверх, вниз, горизонтально и др.). Этим объясняются несколько отличающиеся друг от друга значения этих пределов в различных литературных источниках. В табл. 2.10–2.11 приведены сравнительно достоверные данные, полученные при комнатной температуре и атмосферном давлении при распространении пламени снизу вверх в трубке диаметром 50 мм и более. При распространении пламени сверху вниз или горизонтально нижние пределы несколько возрастают, а верхние снижаются. Пределы воспламеняемости сложных горючих газов, не содержащих балластные примеси, определяются по правилу аддитивности:

$$L_{\Gamma} = (r_1 + r_2 + \dots + r_n) / (r_1/l_1 + r_2/l_2 + \dots + r_n/l_n), \quad (2.25)$$

- где  $L_{\Gamma}$  – нижний или верхний предел воспламеняемости сложного газа в газозудушной или газокислородной смеси, об. %;
- $r_1, r_2, \dots, r_n$  – содержание отдельных компонентов в сложном газе, об. %:  
 $r_1 + r_2 + \dots + r_n = 100$  %;
- $l_1, l_2, \dots, l_n$  – нижние или верхние пределы воспламеняемости отдельных компонентов в газозудушной или газокислородной смеси по данным табл. 2.10 или 2.11, об. %.

При наличии в газе балластных примесей пределы воспламеняемости могут быть определены приближенно:

$$L_{\sigma} = L_{\Gamma} [1 + B / (1 - B) \cdot 100] / [100 + L_{\Gamma} B / (1 - B)], \quad (2.26)$$

- где  $L_{\sigma}$  – верхний и нижний пределы воспламеняемости смеси с балластными примесями, об. %;
- $L_{\Gamma}$  – то же, горючей смеси, об. %;
- $B$  – количество балластных примесей, доли единицы.

При теплотехнических расчетах, химических анализах газозудушной смеси и разработке мероприятий по технике безопасности часто необходимо знать коэффициент избытка воздуха  $\alpha$  при разных пределах воспламеняемости (см. табл. 2.10), а также давление, возникающее при взрыве газозудушной смеси.

Коэффициент избытка воздуха, соответствующий верхнему или нижнему пределам воспламеняемости, можно определить по формуле

$$\alpha = (100/L - 1) (1/V_{\Gamma}). \quad (2.27)$$

Давление, возникающее при взрыве газозудушных смесей, обычно измеряют на специальных установках. Опыт показывает, что максимальное давление взрыва соответствует не стехиометрической, а смеси с несколько большей концентрацией газа в газозудушной смеси.

Таблица 2.10

Пределы воспламеняемости газов в смеси с воздухом  
(при  $t = 20\text{ }^\circ\text{C}$  и  $p = 101,3\text{ кПа}$ )

Газ	Содержание газа в газовой смеси, об. %				Максимальное давление взрыва, МПа	Коэффициент избытка воздуха $\alpha$ при пределах воспламенения	
	при пределах воспламеняемости		при стехиометрическом составе смеси	при составе смеси, дающем максимальное давление взрыва		нижнем	верхнем
	нижнем	верхнем					
Водород	4,0	75,0	29,5	32,3	0,739	9,8	0,15
Оксид углерода	12,5	74,0	29,5	—	—	2,9	0,15
Метан	5,0	15,0	9,5	9,8	0,717	1,8	0,65
Этан	3,2	12,5	5,68	6,28	0,725	1,9	0,42
Пропан	2,3	9,5	4,04	4,60	0,858	1,7	0,40
<i>n</i> -Бутан	1,7	8,5	3,14	3,6	0,858	1,7	0,35
Изобутан	1,8	8,4	3,14	—	—	~1,8	0,35
<i>n</i> -Пентан	1,4	7,8	2,56	3,0	0,865	1,8	0,31
Этилен	3,0	16,0	6,5	8,0	0,886	2,2	0,17
Пропилен	2,4	10,0	4,5	~5,1	~0,89	1,9	0,37
Бутилен	1,7	9,0	3,4	~4,0	~0,88	1,7	0,35
Ацетилен	2,5	80,0	7,75	14,5	1,03	3,3	0,019

При отсутствии экспериментальных данных давления, возникающие при взрыве газовой смеси, могут быть определены с достаточным для практики приближением по следующим формулам:

- для стехиометрического соотношения простого газа с воздухом

$$p_{\text{вз}} = p_{\text{н}} (1 + \beta t_{\text{к}}) (m/n); \quad (2.28)$$

- для любого соотношения сложного газа с воздухом

$$p_{\text{вз}} = \frac{p_{\text{н}} (1 + \beta t_{\text{к}}) V_{\text{п.с}}^{\text{вл}}}{(1 + \alpha V_{\text{т}})}, \quad (2.29)$$

где  $p_{\text{вз}}$  — давление, возникающее при взрыве, МПа;

$p_{\text{н}}$  — начальное давление (до взрыва), МПа;

$\beta$  — коэффициент объемного расширения газов, численно равный коэффициенту давления ( $1/273$ );

$t_{\text{к}}$  — калориметрическая температура горения,  $^\circ\text{C}$ ;

$m$  — число молей после взрыва, определяемое по реакции горения газа в воздухе;

$n$  — число молей до взрыва, участвующих в реакции горения;

$V_{\text{п.с}}^{\text{вл}}$  — объем влажных продуктов сгорания на  $1\text{ м}^3$  газа,  $\text{м}^3$ ;

$V_{\text{т}}$  — теоретический расход воздуха,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ .

Т а б л и ц а 2 . 1 1

Пределы воспламеняемости газов в смеси с кислородом  
(при  $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $p = 101,3\text{ кПа}$ )

Газ	Содержание газа в газокислородной смеси, об. %, при пределах воспламеняемости		Газ	Содержание газа в газокислородной смеси, об. %, при пределах воспламеняемости	
	нижнем	верхнем		нижнем	верхнем
Водород	4,0	94,0	Изобутан	1,7	49,0
Оксид углерода	12,5	94,0	Этилен	3,0	80,0
Метан	5,0	61,0	Пропилен	2,0	53,0
Этан	3,0	56,0	Бутилен	1,47	50,0
Пропан	2,2	55,0	Ацетилен	2,5	89,0
<i>n</i> -Бутан	1,7	49,0			

Давления взрыва, приведенные в табл. 2.12 или определенные по формулам, могут возникнуть только в том случае, если происходит полное сгорание газа внутри емкости и ее стенки рассчитаны на эти давления. В противном случае они ограничены прочностью стенок или их наиболее легко разрушающихся частей.

Объясняется это тем, что нарастающие за счет расширения горячей части газа импульсы давления распространяются по не вступившей в реакцию газозвушной смеси со скоростью звука и достигают ограждения значительно быстрее перемещающегося фронта пламени. Это приводит к разрушению ослабленных частей ограждений до полного выгорания взрывчатой смеси и её сбросу через открывшиеся проемы в атмосферу.

Различие скоростей распространения пламени и разница в давлении широко используются на практике для защиты топок, газоходов, зданий и любых других устройств от разрушения при взрыве путем установки в проемах стен и перекрытий легко открывающихся или разрушающихся фрамуг, панелей, клапанов и остекленных переплетов для стен зданий. Возникающее при взрыве давление зависит от конструкции защитных устройств и коэффициента сброса  $k_{сб}$ , представляющего собой отношение площади защитных устройств к объему сооружения, в котором происходит взрыв (табл. 2.12). Наиболее надежными защитными устройствами, обеспечивающими наименьшее давление взрыва, являются поворотные оконные переплеты или другие поворотные конструкции с боковыми шарнирами, а также легкие свободно лежащие плиты. Выбор вида защитных устройств и коэффициента сброса осуществляют исходя из прочности ограждающих конструкций и местных условий. Для наиболее распространенных кирпичных ограждений толщиной 1,5 и 2 кирпича прочность может приниматься равной соответственно 0,015 и 0,025 МПа.

Таблица 2.12

Давление, возникающее при взрыве пропановоздушной смеси\*, в зависимости от коэффициента сброса  $k_{сб}$  и вида защитного устройства

Вид защитного устройства	Коэффициент сброса $k_{сб}$ , м <sup>2</sup> /м <sup>3</sup>		
	0,063	0,033	0,016
Одиарное глухое остекление с наружным креплением стекла толщиной 3 мм	0,005	0,009	0,019
Двойное глухое остекление с наружным креплением стекла толщиной 3 мм	0,007	0,015	0,029
Поворотный одиарный оконный переплет с боковым шарниром и пружинным замком на нагрузку 5 МПа/ м <sup>2</sup>	0,002	–	–
То же, с верхним шарниром	0,003	–	–
Свободно лежащие на перекрытии плиты массой, кг/м <sup>2</sup> :			
50	0,0023		
100	0,005		
200	0,018		

\*Данные Московского инженерно-строительного института, полученные при проведении экспериментальных взрывов пропановоздушной смеси, близкой к стехиометрии, в камере кубической формы объемом 14 м<sup>3</sup>. Этими данными можно руководствоваться для любых других газоопасных смесей.

## 2.6. Горение в неподвижной среде

Если прозрачную трубку, закрытую с одного конца, заполнить однородной горючей смесью и поджечь эту смесь у открытого конца трубки, то можно наблюдать менискообразную пламенную зону, перемещающуюся вдоль трубки по газовой смеси. При этом в каждый момент времени эта пламенная зона – фронт пламени – отделяет не вступившую в реакцию горючую смесь от продуктов горения.

Перемещение фронта пламени вызывается тем, что холодная горючая смесь перед ним нагревается до температуры воспламенения за счет теплопроводности и диффузии раскаленных продуктов горения в холодную смесь. Линейная скорость, с которой перемещается фронт пламени по однородной горючей смеси, получила название равномерной скорости распространения пламени. Как показано на рис. 2.1, скорость распространения пламени зависит как от вида газа, так и от его содержания в газовой смеси. При этом минимальная скорость для всех видов горючих газов соответствует нижнему и верхнему пределам воспламенения, а максимальная – не стехиометрическим соотношениям газов и воздуха, а некоторым недостаткам последнего. Экспериментальные работы показывают также, что скорость распространения пламени зависит от диаметра трубки, воз-

растая с его увеличением. Объясняется это тем, что с увеличением диаметра трубки снижается влияние ее стенок на процесс горения и перемещающийся фронт пламени способствует в большей мере усилению конвективных потоков, увеличению завихрений в предпламенной зоне, растягиванию фронта горения и росту скорости распространения пламени (рис. 2.2). Положение кривых графика показывает также, что при очень малых размерах трубок распространение пламени становится невозможным вообще.

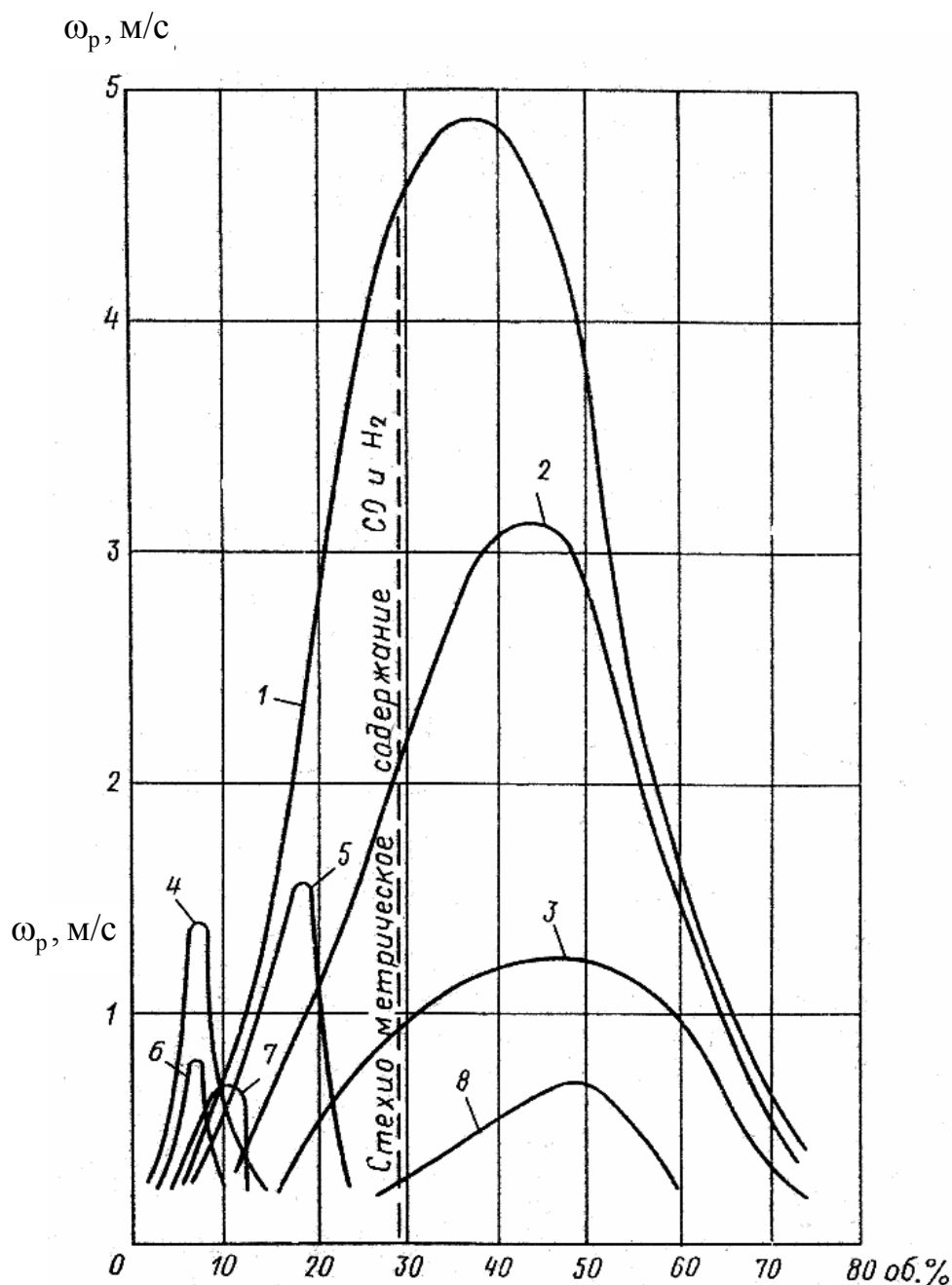


Рис. 2.1. Кривые равномерных скоростей распространения пламени  $\omega_p$ , определенные в трубке диаметром 25,4 мм:  
 1 — водород; 2 — водяной газ; 3 — оксид углерода; 4 — этилен; 5 — коксовый газ;  
 6 — этан; 7 — метан; 8 — генераторный газ паровоздушного дутья

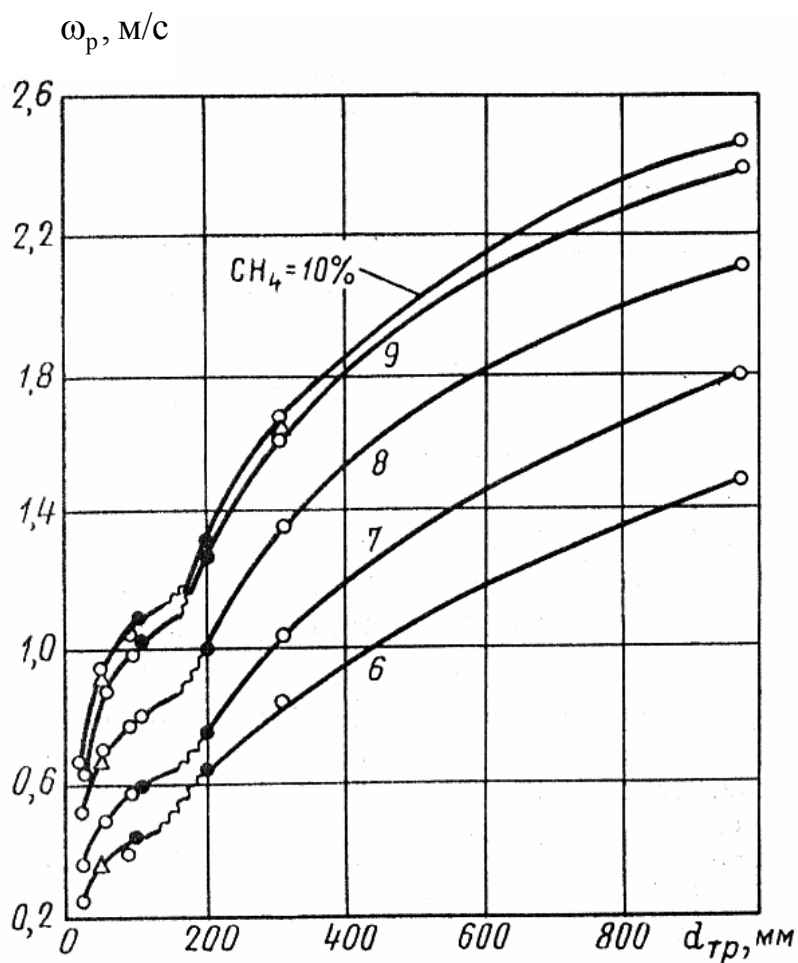


Рис. 2.2. Влияние диаметра трубки  $d_{tr}$  и концентрации метана в смеси с воздухом на изменение равномерной скорости распространения пламени  $\omega_p$

Объясняется это тем, что уменьшение диаметра трубок, например, приводит к возрастанию отношения их поверхности к объему и, как следствие, к увеличению отношения теплоотвода в окружающую среду к тепловыделению в трубке. Размеры трубок, каналов и щелей, при которых не происходит распространения пламени, называются критическими размерами. Они различны для разных газов: для холодной смеси метана с воздухом с максимальной скоростью горения критический размер канала  $\sim 3$  мм, а для водородно-воздушной смеси – только 0,9 мм. Критический размер щели для той же смеси метана с воздухом  $\sim 1,2$  мм. Свойства погасания пламени в каналах малого сечения широко используются в практике для создания различных конструкций огнепреградителей (пламегасящие сетки, керамические пористые диски, диски из спрессованных металлических шариков, сосуды, заполненные мелкозернистыми материалами и др.); огневые каналы или щели малого сечения – в некоторых конструкциях газовых горелок, работающих на газоздушных смесях, соответствующих пределам воспламенения.

Для сравнительной характеристики горючих свойств различных газов (независимо от размеров трубок) введено понятие «нормальная скорость



распространения пламени», представляющая собой скорость, с которой пламя перемещается по нормали к ее поверхности. При этом фронт пламени принимается плоским и равным диаметру трубки. Математически это может быть выражено следующей зависимостью:

$$u_n = \omega_p \pi r^2 / S, \quad (2.30)$$

где  $u_n$  – нормальная скорость распространения пламени, м/с;

$\omega_p$  – измеренная равномерная скорость распространения пламени, м/с;

$r$  – радиус трубки, м;

$S$  – площадь поверхности искривленного фронта пламени, найденная путем ее фотографирования и расчета, м<sup>2</sup>.

В практике максимальную нормальную скорость распространения пламени необходимо знать, например, для определения пределов устойчивости пламени горелок, работающих на гомогенных горючих смесях, для решения вопросов взаимозаменяемости различных газов и т.д. (табл. 2.13).

Как видно из табл. 2.13, максимальная скорость распространения пламени соответствует смесям газа и воздуха, не стехиометрическим, а с недостатком окислителя. Объясняется это тем, что при избытке горючего повышаются полнота и эффективность столкновения реагирующих частиц и, как следствие, несколько возрастает скорость химических реакций.

Нормальные скорости распространения пламени для газокислородных смесей на порядок выше, чем для газоздушных. Так, максимальная нормальная скорость распространения пламени метано-кислородной смеси 3,3 м/с, а для смеси пропана и бутана с кислородом 3,5–3,6 м/с.

Т а б л и ц а 2 . 1 3

Скорости распространения пламени, м/с,  
в различных газоздушных смесях (при  $t = 20$  °С и  $p = 101,3$  кПа)

Газ	Смесь с максимальной нормальной скоростью распространения пламени			Стехиометрическая смесь		
	Содержание в смеси, об. %		Максимальная нормальная скорость распространения	Содержание в смеси, об. %		Максимальная нормальная скорость распространения
	газа	воздуха		газа	воздуха	
Водород	42,0	58,0	2,67	29,5	70,5	1,6
Оксид углерода	43,0	57,0	0,42	29,5	70,5	0,30
Метан	10,5	89,5	0,37	9,5	90,5	0,28
Этан	6,3	93,7	0,40	5,7	94,3	0,32
Пропан	4,3	95,7	0,38	4,04	95,96	0,31
<i>n</i> - Бутан	3,3	96,7	0,37	3,14	96,86	0,30
Этилен	7,0	93,0	0,63	6,5	93,5	0,5
Пропилен	4,8	95,2	0,44	4,5	95,5	0,37
Бутилен	3,7	96,3	0,43	3,4	96,6	0,38
Ацетилен	10,0	90,0	1,35	7,75	92,25	1,0

Максимальная нормальная скорость распространения пламени в смеси сложного газа с воздухом  $u_n^{\max}$ , м/с, определяется по формуле

$$u_n^{\max} = (r_1 u_1 + r_2 u_2 + \dots + r_n u_n) / (r_1 + r_2 + \dots + r_n), \quad (2.31)$$

где  $r_1, r_2, \dots, r_n$  – содержание отдельных компонентов в сложном газе, об. %;

$u_1, u_2, \dots, u_n$  – максимальные нормальные скорости распространения пламени компонентов сложного газа в смеси с воздухом, м/с.

Приведенные выше формулы (2.30) и (2.31) основаны на эффективности горючих свойств компонентов, входящих в сложный газ. Поэтому они дают точные значения для газов, обладающих близкими нормальными скоростями распространения пламени, например для природных и сжиженных углеводородных газов.

Для смесей газов, обладающих резко различными скоростями распространения пламени, например для смесей природных и искусственных газов, и высоким содержанием водорода, они дают только приближенные значения. Кроме того, они пригодны для газов, не содержащих балластных примесей в виде азота и диоксида углерода, которые приводят к снижению скорости распространения пламени.

Для газов с балластными примесями скорость распространения пламени  $u_n^{\circ}$  определяется приближенно по формуле

$$u_n^{\circ} = u_n^{\max} (1 - 0,01N_2 - 0,012CO_2). \quad (2.32)$$

Значительное влияние на скорость распространения пламени оказывает предварительный подогрев газовой смеси:

$$u_n' = u_n (T'/T), \quad (2.33)$$

где  $u_n'$  – скорость распространения пламени в нагретой смеси с абсолютной температурой  $T'$ , К;

$u_n$  – то же, в холодной смеси с температурой  $T$ , К.

Если учесть, что при предварительном нагреве смеси ее плотность изменяется обратно пропорционально абсолютной температуре, массовые скорости распространения пламени растут примерно пропорционально этой температуре. Это обстоятельство необходимо учитывать при расчете газовых горелок, особенно в тех случаях, когда их огневые каналы располагаются в нагретой кладке или когда на них воздействует излучение топки, раскаленных газов и т.п. При этом температуру газовой смеси в пристенной области можно с достаточным для практики приближением принимать равной температуре стенки огневого канала горелки.

Рассмотренная выше равномерная скорость распространения пламени возможна при условии, когда трубка имеет небольшую длину и горение распространяется при сравнительно постоянном давлении, близком к атмо-

сферному. Если длина трубки значительна, то равномерное распространение пламени для некоторых газоздушных, особенно газокислородных, смесей может перейти в вибрационное, а затем и в детонационное, со сверхзвуковой скоростью горения (2000 м/с и более).

Воспламенение смеси при этом происходит за счет не теплопроводности и молекулярной диффузии, а ударной волны, сжижающей и нагревающей горючую смесь до температур, превышающих температуру самовоспламенения. Установлено, что детонация возникает преимущественно в смесях, обладающих относительно высокими скоростями распространения пламени.

Давление, возникающее при детонационном горении, может превышать начальное в 30–40 раз и приводить к разрушению труб и других сосудов, рассчитанных на высокие давления.

## 2.7. Горение в ламинарном потоке

Выше был рассмотрен процесс перемещения фронта пламени в неподвижной горючей смеси. Теоретически этот фронт может быть остановлен, если создать встречное движение горючей смеси со скоростью, равной нормальной скорости распространения пламени. В практике это достигается с помощью горелок, предназначенных для сжигания газа. Наглядным примером остановленного фронта пламени является поверхность внутреннего конуса бунзеновской горелки. За счет регулирования состава газоздушной смеси, вытекающей из горелки при ламинарном режиме движения, можно добиться появления устойчивого и резко очерченного конуса горения (рис. 2.3). Боковая поверхность конуса или фронт пламени, неподвижная относительно огневой кромки канала горелки, будет двигаться по направлению к газоздушной смеси, вытекающей из горелки. Пламя в этом случае распространяется по нормали к поверхности воспламенения в каждой ее точке. При этом на поверхности конусного фронта пламени сохраняется равенство скоростей – проекции скорости потока газоздушной смеси на нормаль  $\omega_n$  к образующей конуса и нормальной скорости распространения пламени  $u_n$ :

$$\omega_n = \omega_{\text{пот}} \cos\varphi = u_n, \quad (2.34)$$

где  $\varphi$  – угол между направлением потока и нормалью к поверхности конусного фронта пламени;

$\omega_{\text{пот}}$  – средняя скорость потока газоздушной смеси, проходящей через горелку за единицу времени, м/с.

Приведенное равенство носит название закона Михельсона.

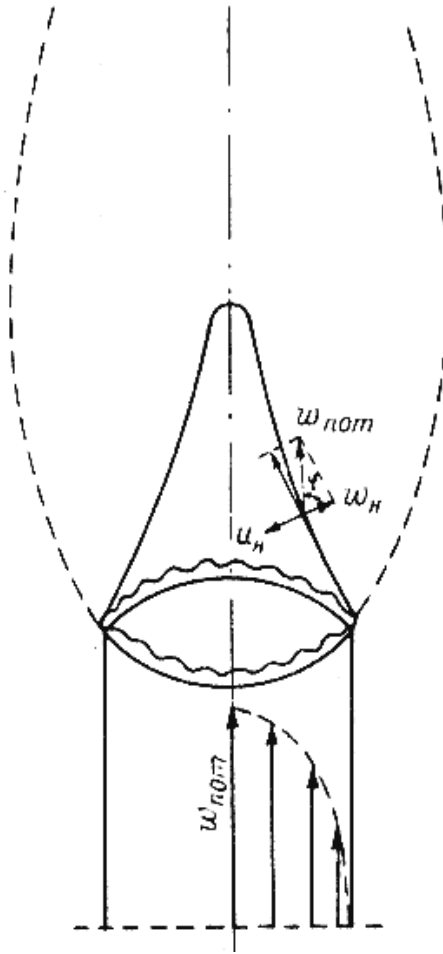


Рис. 2.3. Фронт горения газовой смеси при ламинарном режиме движения

Следует отметить, что постоянство нормальной скорости распространения пламени имеет место только для основной части боковой поверхности конусного фронта пламени. В вершине конуса наблюдается увеличение скорости распространения пламени за счет интенсивного прогрева газовой смеси близкими участками конусной поверхности фронта пламени, а у основания конуса – её снижение за счет охлаждающего воздействия торцевой части огневого канала горелки.

Для приближенных, допустимых в практике расчетов, обычно принимают скорость прохождения смеси через фронт пламени постоянной, равной  $u_n$ , по всей поверхности конуса. Это позволяет определить усредненную нормальную скорость распространения пламени путем деления объема проходящей через горелку газовой смеси  $V_{см}$  на площадь поверхности конусного фронта пламени:

$$u_n = V_{см}/S. \quad (2.35)$$

Если принять, что конусный фронт пламени имеет правильную геометрическую форму, и выразить объем смеси, проходящей через горелку в

единицу времени, через  $\pi R^2 \omega_{\text{пот}}$ , а площадь поверхности конусного фронта через  $\pi R \sqrt{H^2 + R^2}$ , то формулу (2.35) можно представить так:

$$u_{\text{н}} = \pi R^2 \omega_{\text{пот}} / \pi R \sqrt{H^2 + R^2} = R \omega_{\text{пот}} / \sqrt{H^2 + R^2}, \quad (2.36)$$

где  $R$  – радиус горелки – основания конусного фронта, м;  
 $H$  – высота конусного фронта пламени, м.

Так как конусный фронт пламени не является строго геометрическим, то для более точного определения  $S$  пламя фотографируют, делают графическим путем разбивку фронта пламени на ряд усеченных конусов и, суммировав боковые поверхности фронта пламени, получают общую поверхность конусного фронта пламени.

Значения нормальных скоростей распространения пламени, определенные методом бунзеновской горелки, равно как и любыми другими методами, одинаковы и равны нормальным скоростям, приведенным в табл. 2.13.

Из формулы (2.36) путем преобразований можно получить зависимость

$$H = R \sqrt{\omega_{\text{пот}} / u_{\text{н}}^{-1}}, \quad (2.37)$$

которая показывает, что высота конусного фронта пламени зависит главным образом от размера огневого канала горелки, так как скорость потока газоздушной смеси в бунзеновских горелках не намного превышает нормальную скорость распространения пламени. Это значит, что уменьшение высоты пламени может достигаться дроблением крупных огневых каналов на несколько мелких. Для одинаковых по составу газоздушных смесей высота конусных фронтов пламени малых каналов  $h$  может быть приближенно определена по высоте фронта пламени одиночного канала  $H$ :

$$h = H / \sqrt{n}, \quad (2.38)$$

где  $n$  – число малых каналов.

## 2.8. Горение в турбулентном потоке

Горение в ламинарном потоке осуществляется в многочисленных инжекционных горелках бытовых и коммунальных аппаратов, отопительных печей, секционных котлов с малой поверхностью нагрева и других, работающих с низкой тепловой мощностью. Для горелок с высокой тепловой мощностью (горелки промышленных котлов, печей и т.п.) горение, как правило, происходит в турбулентном потоке. При переходе ламинарного потока в турбулентный гладкий конусный фронт пламени вследствие вихревого движения и пульсаций начинает размываться и терять четкое конус-

ное очертание. При этом наблюдаются два характерных вида горения, соответствующие мелко- и крупномасштабной турбулентности.

При мелкомасштабной турбулентности, не превышающей толщины зоны ламинарного горения, конусный фронт пламени сохраняет свою форму и остается гладким, хотя толщина зоны горения увеличивается. Если же масштаб турбулентности несколько превышает толщину зоны ламинарного горения, поверхность конусного фронта пламени становится неровной, волнующейся, имеющей как бы выступы и впадины. Это ведет к увеличению суммарной поверхности фронта горения и, как следствие, к способности одновременного сжигания больших количеств горючей смеси на единицу поперечного сечения потока.

При крупномасштабной турбулентности, значительно превышающей толщину зоны ламинарного горения, волнение поверхности фронта пламени приводит к отрыву отдельных частиц горячей смеси, дробящихся последующими пульсациями. Фронт пламени при этом теряет свою целостность и превращается в систему отдельных очажков горения в виде равных, расчлениющихся и сгорающих в потоке частиц горючей смеси. Таким образом, при крупномасштабной турбулентности, создаваемой как турбулентным потоком, так и самим процессом горения, поверхность фронта пламени, слагаясь из поверхностей всех горящих частиц, увеличивается, приводя к резкому росту скорости распространения пламени (рис. 2.4). Способствует этому и то обстоятельство, что в этом случае может происходить не только фронтное горение, распространяющееся с нормальной скоростью  $u_n$ , но и объемное, возникающее за счет турбулентных пульсаций раскаленных продуктов горения в свежую смесь. Следовательно, суммарная скорость распространения пламени при крупномасштабной турбулентности определяется тем или иным сочетанием элементов фронтного и объемного горения.

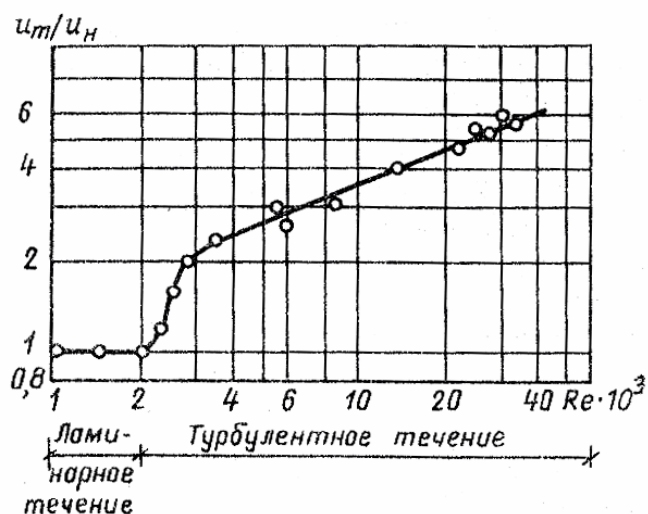


Рис. 2.4. Изменение относительной скорости распространения пламени коксового газа в смеси с воздухом в зависимости от числа Рейнольдса и режима движения смеси

Турбулентную скорость распространения пламени  $u_T$  применительно к фронтальной модели горения обычно выражают следующей зависимостью:

$$u_T = u_H \sqrt{1 + B(\omega' / u_H)^2}, \quad (2.39)$$

где  $\omega'$  – средняя квадратическая пульсационная скорость, зависящая от средней скорости потока;

$B$  – безразмерный коэффициент, зависящий от физико-химических свойств газа, близкий к 1.

Эта формула показывает, что при отсутствии пульсаций турбулентная скорость горения становится равной нормальной скорости распространения пламени. Наоборот, если пульсационная скорость значительно превышает нормальную, турбулентная скорость горения становится мало зависящей от физико-химических свойств горючей смеси, т.е. от  $u_H$ :

$$u_T \approx \omega' \sqrt{B} \approx \omega'.$$

Последнее подтверждается и экспериментальными наблюдениями, показывающими сравнительно малую зависимость скорости сгорания различных гомогенных газоздушных смесей с  $\alpha \geq 1$  в промышленных топках от нормальной скорости распространения пламени.

## 2.9. Устойчивость горения

Основными факторами, влияющими на устойчивость горения, являются скорости истечения газоздушной смеси и распространения пламени. При горении газоздушных смесей в ламинарном потоке устойчивой частью конусного фронта пламени является только его нижняя, периферийная, часть. В этом месте фронт пламени за счет расширения вытекающей в атмосферу газоздушной смеси и тормозящего действия стенки канала развернут на горизонталь и приподнят над кромкой канала на толщину фронта пламени (на 0,5–0,6 мм для природного газа) (рис. 2.5).

Это приводит к тому, что на данном участке фронта пламени происходит полная компенсация скорости газоздушного потока скоростью распространения пламени  $u_H = \omega_{\text{пот}}$ . Равенству этих скоростей способствует то обстоятельство, что снижение скорости распространения пламени за счет охлаждения смеси стенкой канала сопровождается одновременным снижением скорости потока у стенки за счет ее тормозящего воздействия. На всем остальном конусном участке фронта пламени компенсация имеет частичный характер и осуществляется только в направлении, нормальном к фронту горения:  $u_H = \omega_{\text{пот}} \cos\varphi$ . Вторая составляющая  $u_H = \omega_{\text{пот}} \sin\varphi$  остается неуравновешенной и сносит точку воспламенения от основания конуса к его вершине. Таким образом, стабилизация конусного фронта пламени

обусловливается наличием постоянного источника зажигания в виде кольцевого пояска, без которого остальная часть фронта была бы снесена потоком газовой смеси.

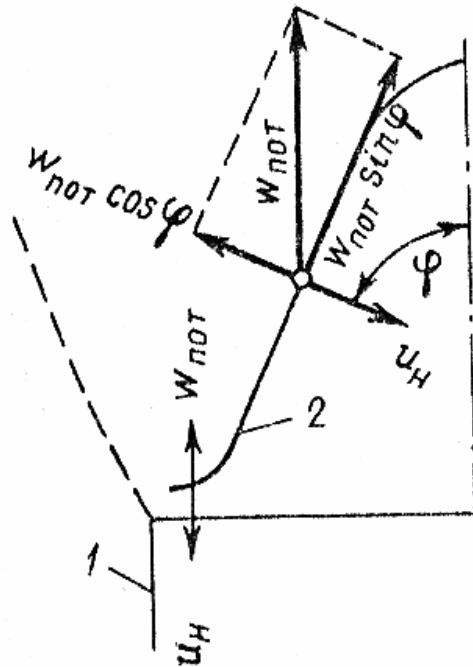


Рис. 2.5. Схема прямой компенсации  $u_H = \omega_{\text{пот}}$  при ламинарном движении газовой смеси:  
1 – стенка горелки; 2 – фронт пламени

Если скорость газовой смеси превышает скорость распространения пламени, в особенности при переходе ламинарного режима движения в турбулентный, ширина зажигающего пояска начинает уменьшаться, пока не станет ничтожно малой. В этом случае устойчивость фронта пламени нарушается, оно начинает отрываться от горелки. Наоборот, если скорость распространения пламени в кольцевой пристенной области (не на стенке) превысит скорость истечения газовой смеси, пламя начнет втягиваться внутрь смесителя горелки. Первый случай получил название отрыва, а второй проскока пламени.

В практике при отрыве пламени наблюдаются следующие явления: срыв пламени с горелки, вызывающий его погасание; отрыв от кромки огневого канала, когда пламя достигает нового достаточно устойчивого положения в потоке над горелкой; срыв поднятого пламени, ведущий к его погасанию; отброс приподнятого факела к кромке огневого канала горелки; создание взвешенного пламени при поджигании струи на некотором расстоянии от горелки. Все эти явления недопустимы, так как приводят к накоплению в окружающей атмосфере или в топке несгоревшего газа.



На рис. 2.6 приведены усредненные экспериментальные кривые отрыва пламени от кромок огневых каналов инжекционных однофакельных горелок, работающих в открытой спокойной атмосфере на смеси холодного природного газа с воздухом. На границе и выше указанных кривых начинается отрыв пламени, а ниже кривых идет устойчивое горение.

В практике газоснабжения бытовых и коммунальных потребителей широко распространены различные конструкции многофакельных инжекционных горелок с огневыми каналами диаметром от 2 до 6 мм (рис. 2.7). Установление скоростей отрыва пламени  $\omega_{отр}$  для этих горелок может производиться также по следующей приближенной формуле

$$\omega_{отр} = 3,5 \cdot 10^{-3} d_k T^2 (1 + V_T) / (1 + \alpha_1 V_T), \quad (2.41)$$

где  $d_k$  – диаметр огневых каналов, м;

$\alpha_1$  – коэффициент избытка первичного воздуха;

$T$  – абсолютная температура газозвушной смеси, К.

Эта формула показывает, что стабильность горения в отношении отрыва пламени растет с увеличением диаметров огневых каналов и температуры и снижается с увеличением коэффициента избытка первичного воздуха.

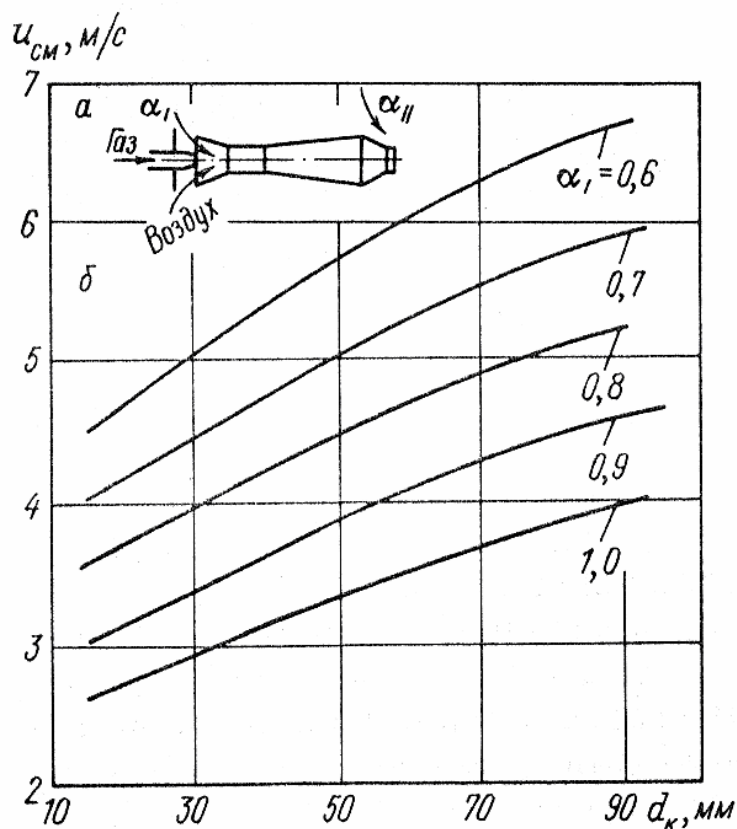


Рис. 2.6. Зависимость скорости отрыва пламени одиночного пламени в открытой атмосфере смесей природного газа с воздухом от размера огневого канала и содержания первичного воздуха: а – схема горелки; б – кривые отрыва пламени

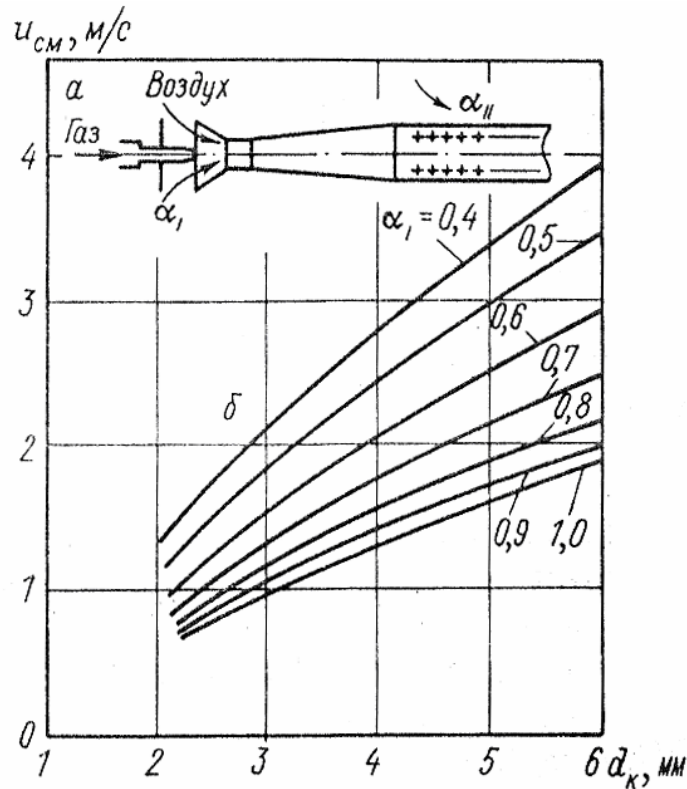


Рис. 2.7. Зависимость скорости отрыва многофакельного пламени в открытой атмосфере смесей природного газа с воздухом от размера огневых каналов и содержания первичного воздуха: а – схема горелки; б – кривые отрыва пламени

При многофакельных горелках стабильность горения повышается также за счет взаимного влияния пламени. Приведенными графиками и формулой с достаточной для практики точностью можно руководствоваться как для природных, так и для других газов с близкими нормальными скоростями распространения пламени, например для нефтяных и сжиженных углеводородных газов.

В некоторых случаях отрыв пламени от огневых каналов происходит по причинам, не зависящим от рассмотренных выше факторов. Так, при неправильном расположении горелки и несовершенном отводе продуктов сгорания последние могут попасть в инжектор горелки и привести к отрыву пламени, который происходит за счет снижения скорости распространения пламени в газозоудушной смеси, разбавленной инертными газами. Причиной отрыва могут послужить и высокая скорость вторичного воздуха, сдувающего пламя с огневых каналов, а также такое расположение горелки, при котором инжектор и огневые каналы находятся в резко различных условиях наружного давления (например, расположение инжектора в атмосфере помещения, а распределительного коллектора с огневыми каналами в топке котла, работающей в условиях переменных разрежений).

Недопустимым является не только отрыв, но и проскок пламени внутрь смесителя горелки. Проскок пламени обычно сопровождается хлопком и

приводит либо к погасанию пламени и выходу несгоревшей смеси в помещение или топку, либо горению смеси внутри горелки. Тенденция пламени к проскоку зависит от вида газа, нормальной скорости распространения пламени, содержания первичного воздуха в газозудушной смеси, размеров огневых каналов, температур смеси или стенок каналов. Влияние на проскок пламени оказывают также коэффициент теплопроводности материалов, из которых выполнены огневые каналы, их форма, глубина и качество изготовления, наличие заусениц, обломов краев и т.п.

Приведенными в табл. 2.14 значениями скоростей гомогенных смесей природных газов с воздухом, при которых происходит проскок пламени внутри смесителей горелок, можно руководствоваться и для определения приближенных скоростей проскока пламени при использовании других горючих газов при введении в них поправок, соответствующих изменению нормальных скоростей распространения пламени:

$$\omega'_{\text{пр}} = \omega_{\text{пр}} u'_n / u_n, \quad (2.42)$$

где  $\omega'_{\text{пр}}$  – скорость проскока пламени для другого газа, м/с;

$\omega_{\text{пр}}$  – то же, для природного газа (по табл. 2.14), м/с;

$u'_n$  – нормальная скорость распространения пламени для другого газа, м/с;

$u_n$  – то же, для метана, м/с.

Т а б л и ц а 2 . 1 4

Приближенные значения скорости гомогенной смеси природного газа с воздухом, при которой происходит проскок пламени, м/с  
(температура смеси 20 °С)

Диаметры огневых каналов	Коэффициент избытка первичного воздуха					
	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1
3,5	0,05	0,10	0,18	0,22	0,23	0,21
4,0	0,08	0,12	0,22	0,25	0,26	0,20
5,0	0,09	0,16	0,27	0,31	0,31	0,23
6,0	0,11	0,18	0,32	0,38	0,39	0,26
7,0	0,13	0,22	0,38	0,44	0,45	0,30
8,0	0,15	0,25	0,43	0,50	0,52	0,35
9,0	0,17	0,28	0,48	0,57	0,58	0,39
10,0	0,20	0,30	0,54	0,64	0,65	0,43

Максимальная скорость проскока соответствует не стехиометрическому соотношению газа и воздуха, а некоторому недостатку последнего, при этом для гомогенной смеси природного газа с воздухом она может быть рассчитана по приближенной формуле

$$\omega_{\text{пр}} = 0,73 \cdot 10^{-3} d_k T^2. \quad (2.43)$$

Этой формулой с достаточным для практики приближением можно руководствоваться и для других газов с введением поправки на изменение нормальной скорости распространения пламени.

Из рассмотренных данных можно сделать вывод о том, что пределы устойчивости работы горелок ограничиваются скоростями отрыва и проскока пламени.

На рис. 2.8 приведены экспериментальные кривые, характеризующие скорости потока смеси природного газа с воздухом, при которых происходят отрыв и проскок пламени. Характер этих кривых свидетельствует о резком снижении устойчивости пламени по мере увеличения содержания в смеси первичного воздуха. Повышение устойчивости пламени происходит при снижении содержания в смеси первичного воздуха и достигает максимума при его уменьшении до нуля, т.е. при переходе к диффузионному горению. Однако такое сжигание углеводородных газов во многих случаях недопустимо, так как приводит к появлению желтых язычков пламени, характеризующих появление в нем сажистых частиц.

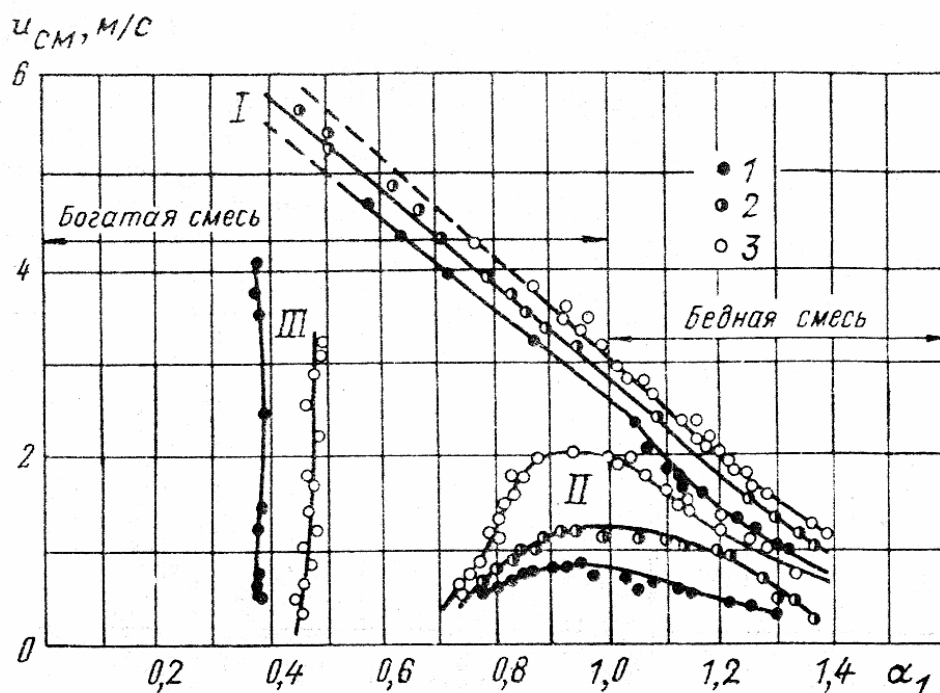


Рис. 2.8. Зависимость скорости газовой смеси, при которой происходит отрыв и проскок пламени, от коэффициента избытка первичного воздуха  $\alpha_1$ :  
 I — отрыв пламени; II — проскок пламени; III — желтые края пламени;  
 1—3 — диаметры огневых каналов горелок, мм: 1—15, 2—25, 3—32

В практике для расширения диапазона устойчивости горения любых горючих газоздушных смесей скорость потока принимается в несколько раз большей, чем скорость отрыва. Предотвращение отрыва пламени в этих случаях достигается различными искусственными стабилизаторами горения (рис. 2.9).

Для стабилизации пламени инжекционных и других горелок, выдающих осесимметричные газоздушные струи, широко применяются огнеупорные цилиндрические туннели с внезапным расширением их сечений, в которых происходит воспламенение и горение смеси (рис. 2.9,а). Стабилизирующее действие такого туннеля основано на периферийной рециркуляции части раскаленных продуктов горения, возникающей за счет создаваемого струей разрежения. Это приводит к непрерывному теплообмену между раскаленными газами и втекающей в туннель холодной горючей смесью и ее зажиганию с периферии. Способствует стабилизации пламени и высокая температура стенок туннеля, более чем в 2 раза превышающая температуру самовоспламенения природного газа.

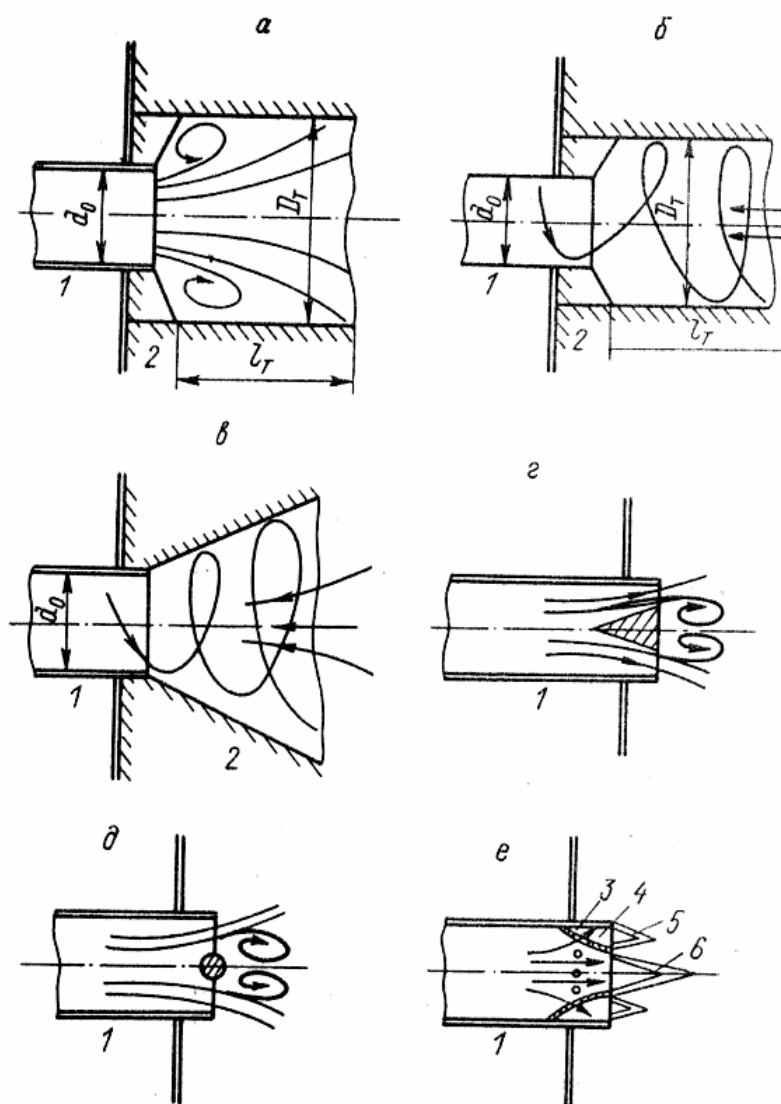


Рис. 2.9. Распространенные стабилизаторы горения:  
 а – цилиндрический туннель с внезапным расширением сечения; б – то же, при закрученном потоке; в – конический туннель при закрученном потоке;  
 г – стабилизатор в виде конического тела; д – то же, в виде круглого стержня;  
 е – то же, в виде устойчивого кольцевого пламени; 1 – огневой насадок горелки;  
 2 – туннель; 3 – боковое отверстие; 4 – кольцевой канал; 5 – кольцевое пламя;  
 6 – пламя основного потока газоздушной смеси

Наибольшая устойчивость пламени в отношении отрыва соответствует гомогенной смеси, близкой к стехиометрическому составу, и следующим размерам туннеля:  $D_T = 2,5 d_k$ ;  $l_T = (2 \dots 2,5)D_T$ , где  $D_T$  – диаметр расширенной части туннеля;  $l_T$  – длина расширенной части туннеля;  $d_k$  – диаметр огневого канала горелки.

Опытные данные показывают, что при этих размерах не происходит присоса в туннель охлажденных газов из топки, могущих снизить устойчивость горения, а в продуктах сгорания, отбираемых на выходе из туннеля, не обнаруживается основного компонента природного газа – метана. Вместе с тем полного выгорания промежуточных соединений, преимущественно в виде оксида углерода и водорода, не происходит, оно завершается только при длине туннеля, равной  $(5 \dots 6)D_T$ .

Установлено также, что при указанных размерах тепловое напряжение туннеля может достигать  $400 \text{ ГДж/м}^3 \text{ ч}$ , температура  $1600 \text{ }^\circ\text{C}$ , и что пламя стабилизируется при скорости вытекания из горелки холодной смеси до  $200 \text{ м/с}$ . Так как такая стабилизирующая способность огнеупорных туннелей превышает необходимую в практике длину туннелей в  $10\text{--}20$  раз, для увеличения срока их эксплуатации, облегчения изготовления и установки ее ограничивают толщиной кирпичной стены, но не менее  $l_T = (1,5 \dots 2)D_T$ . В некоторых случаях сокращают и диаметр туннеля до  $D_T = (1,5 \dots 2)d_k$ , но это приводит к некоторому увеличению его гидравлического сопротивления, снижению стабилизирующего действия и переносу выгорания из туннеля в топку не только промежуточных продуктов горения, но и значительной части метана. Применение туннелей с уменьшенными размерами допустимо только для горючих смесей, близких по составу к стехиометрическому. Для бедных и богатых смесей, в особенности приближающихся к нижнему или верхнему пределам воспламеняемости, а также для газов, забалластированных азотом или диоксидом углерода, этого делать не следует, так как может затруднить розжиг газовой смеси и привести к срыву пламени при увеличении форсировки горелки. Нарушение устойчивости горения может происходить и за счет присоса в туннель внешнего воздуха, резко снижающего температуру рециркулирующих продуктов горения. Последнее явление наблюдается как при наличии неплотности между огневым каналом горелки и туннелем, так и при значительном разрежении в топке.

Для стабилизации пламени горелок, выдающих закрученную газоздушную смесь, применяются как рассмотренные выше цилиндрические туннели, так и конические с углом раскрытия  $30\text{--}60^\circ$  (рис. 2.9, в). Стабилизирующее действие при закрученном потоке вызывается тем, что на периферии туннеля возникает большее давление, чем в его центральной части. Это приводит к приосевой рециркуляции части раскаленных продуктов горения и поджиганию втекающей в туннель холодной газоздушной смеси изнутри. Так как закрутка струи приводит к резкому увели-

чению угла раскрытия потока, длину туннелей ограничивают толщиной кирпичной стены, на которой размещаются газовые горелки.

В тех случаях, когда установка туннелей невозможна или нецелесообразна, для стабилизации пламени применяют тела плохообтекаемой формы, размещаемые в потоке газовой смеси на выходе её из огневого канала горелки (рис. 2.9, г, д). Воспламенение смеси при этом происходит на периферии стабилизатора, за которым возникает частичная рециркуляция раскаленных газов, поджигающих горючую смесь изнутри. Стабилизирующее действие таких устройств ниже, чем туннелей, и зависит от состава смеси, а также от конструкции и размеров стабилизатора. Так, конический стабилизатор диаметром 7 мм, установленный в трубке диаметром 18 мм, обеспечивает устойчивое горение стехиометрической метановоздушной смеси при скоростях вылета до 60 м/с, а при коэффициенте избытка воздуха  $\alpha = 0,82$  или 1,4 – только до 30 м/с.

В инжекционных одно- и многофакельных горелках широко используются стабилизаторы горения, образующие вспомогательное кольцевое пламя. Такой стабилизатор выполняется в виде специального огневого насадка горелки (рис. 2.9, е), в котором около 10 % газовой смеси ответвляется через боковые отверстия в кольцевую полость, сечение которой значительно больше суммарной площади боковых отверстий. Стабилизирующее действие этого устройства основано на предотвращении разбавления основного потока в корне факела избыточным воздухом, сужающим пределы его устойчивости, а также на подогреве и поджигании кольцевым пламенем основного потока по всей его периферии. Устойчивость кольцевого пламени при отрыве достигается за счет такого соотношения сечений огневого кольца и боковых отверстий, при котором скорость газовой смеси в кольцевой полости не превышает нормальной скорости распространения пламени. Для предотвращения проскока пламени в смеситель горелки размеры боковых отверстий, формирующих кольцевое пламя, принимаются меньшими критических.

## 2.10. Принципы сжигания

Организация процессов сжигания газа в потоке с воздухом основывается на различных принципах, предельными из которых являются кинетический и диффузионный.

При кинетическом принципе предварительно, до начала процесса горения, создается однородная горючая смесь, содержащая воздух в несколько большем количестве, чем требуется по стехиометрическим соотношениям. Сгорание такой смеси происходит в коротком жестком прозрачном факеле без видимых пиролизических процессов, приводящих к образованию в

пламени сажистых частиц. При этом горение может протекать при неограниченно высоком объемном теплонапряжении, без образования продуктов неполного сгорания. Обычно для сжигания газа по кинетическому принципу применяются специальные смесители или инжекционные горелки, подготавливающие гомогенную газоздушную смесь с коэффициентом избытка первичного воздуха  $\alpha_1 = 1,02 \dots 1,05$ . При меньшем содержании первичного воздуха по кинетическому принципу протекает только начальная стадия горения, до использования кислорода, находящегося в смеси с газом.

Оставшиеся газы и продукты неполного сгорания сжигают за счет диффузии кислорода извне (вторичного воздуха), т.е. по диффузионному принципу. Особенностью факела при  $\alpha_1 < 1$  является наличие двух видимых фронтов горения: внутреннего, возникающего за счет первичного воздуха, и наружного, образующегося за счет диффузии кислорода из окружающей среды. Общая высота пламени при таком горении возрастает, а температура несколько снижается. Устойчивость пламени и его прозрачность зависят от содержания первичного воздуха в смеси. При этом, чем оно выше, тем ниже устойчивость пламени, больше его прозрачность, и наоборот.

Принцип сжигания газа с  $\alpha_1 < 1,0$  является промежуточным (между кинетическим и диффузионным). С учетом этого принципа конструируются все газовые аппараты, оборудованные инжекционными горелками. В таких горелках содержание первичного воздуха в смеси принимается в зависимости от вида газа таким, чтобы в пламени отсутствовали сажистые частицы и чтобы обеспечивалась стабильность горения при изменении тепловой мощности в любых необходимых в практике пределах.

При диффузионном принципе ( $\alpha_1 = 0$ ) процессы горения и смешения развиваются параллельно. Так как процессы смешения протекают значительно медленнее процессов горения, то скорость и полнота сгорания определяются скоростью и полнотой смешения газа и воздуха. Смешение газа с воздухом при этом может происходить путем диффузии либо медленной молекулярной, либо турбулентной, включающей в себя и молекулярную как конечную стадию. Соответственно этому различаются скорость горения и структура диффузионного пламени.

Особенностями такого сжигания являются высокая устойчивость пламени при изменении тепловой мощности от нуля до максимально возможных по условиям отрыва, сравнительное постоянство температур по всей высоте пламени, возможность распределения его по большим поверхностям любых форм, компактность горелок и простота их изготовления, а также значительная высота пламени и неизбежность пиролитических процессов, приводящих к образованию яркого светящегося сажистого пламени.

Диффузионное горение может быть переведено в кинетическое или промежуточное путем создания условий, при которых процессы смешения



несколько опережают процессы горения. В практике это может достигаться за счет дополнительного участка смешения: на горелках с принудительной подачей воздуха. Это приводит к образованию приближающейся к гомогенной газовой смеси с  $\alpha_1 > 1,0$ , сгорающей в прозрачном факеле. Исследования показали, что такой способ является достаточно действенным для улучшения процесса смешения и снижения химической неполноты сгорания (химического недожога).

Перенос же процессов смешения и горения в топку может приводить к появлению продуктов неполного сгорания, в особенности в малогабаритных секционных и водотрубных экранированных топках котлов.

Для иллюстрации принципов сжигания на рис. 2.10, а приведена упрощенная схема свободного ламинарного факела, возникающего за счет взаимной молекулярной диффузии газа и воздуха. Анализ проб, отобранных из различных участков горячей струи, показал, что внутри конусного ядра 1 находится чистый газ, вытекающий из трубки при ламинарном режиме течения. В зоне 2 образуется смесь из газа и продуктов сгорания, а в зоне 3 – смесь из продуктов сгорания и воздуха. Граница 4 между зонами 2 и 3 представляет собой гладкий конусный фронт пламени, к которому снаружи диффундируют молекулы воздуха, а изнутри – молекулы газа. Образовавшиеся во фронте пламени продукты сгорания частично диффундируют навстречу газу, интенсивно нагревая его в предпламенной зоне. Это приводит к пиролизу углеводородов и образованию сажистых частиц, придающих пламени яркую светимость.

Значительная интенсификация горения достигается за счет естественной и искусственной турбулизации смешивающихся потоков. На рис. 2.10, б показана упрощенная схема свободного турбулентного факела. В отличие от ламинарного, здесь нет четкого конусного фронта горения, он размыт и в той или иной мере разрушен пульсациями на отдельные частицы. Анализ проб показал наличие ядра чистого газа 1, зоны сравнительно медленного горения 2 (с преобладающим содержанием в ней газа), размытой зоны наиболее интенсивного горения 3 с высоким содержанием продуктов сгорания и зоны горения 4 с преобладанием в ней воздуха. При этом четких границ между указанными зонами нет, они непрерывно смещаются в зависимости от степени турбулизации потока. Особенности турбулентного факела (сравнительно с ламинарным) являются протекание процесса горения почти по всему объему, повышение интенсивности горения, большая прозрачность пламени и меньшая его устойчивость по отношению к отрыву.

Сжигание газа по этому принципу широко используется в топках различных котлов и печей. При этом для интенсификации процесса горения применяют как естественную (за счет повышения скоростей), так и искус-

ственную турбулизацию потоков газового и в особенности воздушного потоков. Последнее наиболее часто достигается закруткой воздушного потока и выдачей в него под различными углами тонких струй газа.

Практикой сжигания газа в топках экранированных котлов и небольших нагревательных печей обычно не подтверждаются преимущества светящегося сажистого пламени перед прозрачным. Объясняется это следующим: повышение светимости в обычных условиях сжигания углеводородных газов связано с растянутостью процесса горения и, как следствие, с некоторым снижением температуры пламени. Количество же тепловой энергии, передаваемое излучением, повышается линейно с увеличением степени черноты излучающего тепла и пропорционально абсолютной температуре в четвертой степени:

$$E = \varepsilon C_0 T^4, \quad (2.44)$$

где  $\varepsilon$  – степень черноты;

$C_0$  – коэффициент излучения абсолютно черного тела;

$T$  – абсолютная температура пламени.

Расчеты по этой формуле показывают, что увеличение степени черноты пламени в 1,7–2 раза не приводит к увеличению передачи теплоты излучением, если температура пламени при этом снижается на 10–20 %. Это же подтверждают экспериментальные исследования сжигания природного газа в водоохлаждаемых камерах, в результате чего суммарная теплоотдача прозрачного пламени превышает теплоотдачу светящегося пламени.

Исключения составляют только такие методы повышения степени черноты, которые не приводят к значительному снижению температуры пламени, например ввод в пламенную зону небольших количеств газообразных или жидких углеводородов, в особенности подвергшихся предварительному пиролизу. Наибольший эффект при этом достигается в высокотемпературных печах, работающих на нагретом в рекуператорах или регенераторах воздухе, в которых теплоотдача излучением является преобладающим видом теплообмена. Достоинство светящегося пламени для таких печей заключается и в том, что оно излучает тепловую энергию не селективно в пределах полос  $H_2O$  и  $CO_2$ , а по всему спектру, включая и видимую область. Таким образом, выбор того или другого принципа сжигания газа зависит от местных условий и требований технологического процесса. При этом во всех случаях должно обеспечиваться полное сгорание газа, без сброса в окружающую среду значительного количества сажистых частиц, продуктов неполного сгорания и экологически вредных веществ.

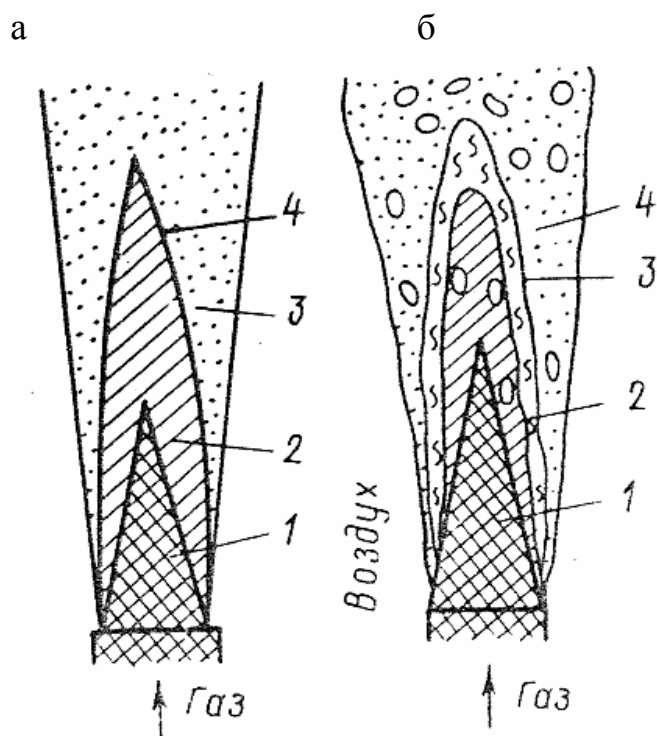


Рис. 2.10. Структура свободных пламен:  
а – ламинарное пламя; б – турбулентное пламя

## 2.11. Образование продуктов неполного сгорания и вредных веществ

При сжигании горючих газов в топках котлов, печей, сушил и в бытовых газовых аппаратах в продуктах сгорания могут содержаться компоненты как полного (диоксид углерода и водяной пар), так и неполного сгорания (оксид углерода, водород, ненасыщенные, насыщенные, ароматические углеводороды и сажистые частицы). Кроме того, в продуктах сгорания обнаруживаются и оксиды азота. Наличие продуктов неполного сгорания в значительных концентрациях недопустимо, так как приводит к загрязнению атмосферы токсическими веществами и к снижению КПД установок, работающих на газовом топливе.

Проведенные разными организациями и в разные годы исследования показали, что все продукты неполного сгорания возникают при сжигании газов с недостаточным количеством воздуха, при неудовлетворительном их смешении до горения и в процессе горения, а также при чрезмерном охлаждении пламени до завершения реакций горения.

На рис. 2.11 показан приближенный усредненный состав некоторых промежуточных соединений [водорода, оксида углерода, этилена, ацетилена и сравнительно небольшое число насыщенных и простейших арома-

тических соединений (последние на графике не показаны)] и диоксида углерода, возникающих в пламени при диффузионном горении природного газа (содержание  $\text{CH}_4 = 97\%$ ). Сжигание газа производилось в ламинарном факеле, газ вытекал из трубки диаметром 12 мм. Общая высота пламени 130–140 мм. Пробы для анализа отбирались кварцевой трубкой по оси пламени на различной высоте.

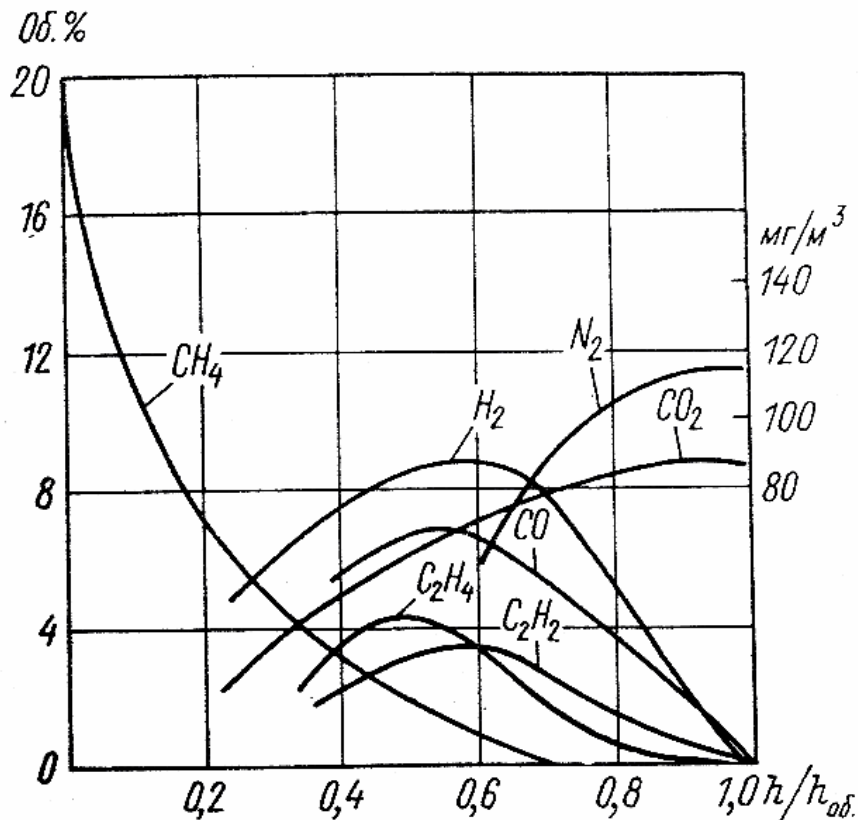


Рис. 2.11. Промежуточные продукты сгорания:  
 $h$  — высота точки отбора пробы;  $h_{об}$  — общая видимая высота пламени

Положение кривых свидетельствует, что максимальная концентрация водорода и ацетилена достигается примерно на одной высоте пламени и что они исчезают почти одновременно в вершине светящейся зоны пламени. Установлено также, что из всех образующихся в пламени промежуточных соединений (исключая сажистые частицы), оксид углерода исчезает последним. Это дает основание судить по индексу оксида углерода об отсутствии или наличии других промежуточных соединений, т.е. о полноте сгорания природного газа. Характерным для всех анализируемых проб является и то, что в них не обнаружен формальдегид, который, по-видимому, не стабилизируется в условиях свободного развития пламени и весьма быстро превращается в оксид углерода и водород. Анализы проб показали также, что в них всегда присутствовали оксиды азота и что их максимальная концентрация возникает в зонах интенсивного выгорания оксида углерода и водорода.

Известно, что горение углеводородных газов с недостатком окислителя в газозудушной смеси приводит к образованию сажистых частиц, придающих пламени желтую окраску, в непосредственной близости от фронта пламени за счет термоокислительного разложения углеводородов. Процесс выгорания частиц сажи протекает стадийно, является сравнительно медленным и неблагоприятным, так как эти частицы перемещаются со скоростью потока и их контакт с окислителем осуществляется только за счет медленной молекулярной диффузии. Это приводит к следующему: выгорание образовавшихся частиц сажи затягивается и может прекратиться полностью при входе в низкотемпературную область факела или при омывании пламенем теплообменных поверхностей. Таким образом, наличие светящегося пламени всегда свидетельствует о протекании пиролитических процессов и о возможности химической неполноты сгорания, в особенности в малогабаритных экранированных топках котлов.

Предотвращение образования сажистых частиц достигается за счет предварительного смешения углеводородных газов с таким количеством окислителя, которое приводит к образованию только оксида углерода и водорода. Теоретически это количество может быть определено по реакции горения с недостатком окислителя, например  $\text{CH}_4 + 0,5 \text{O}_2 = \text{CO} + 2\text{H}_2$ .

Приведенная реакция показывает, что для образования светящего пламени содержание первичного воздуха в смеси должно составлять только 25 % от стехиометрического. Это, однако, не всегда подтверждается практикой, так как даже при указанном содержании образуются не только оксид углерода и водород, но и некоторое количество диоксида углерода, водяного пара и даже непрореагировавший метан. Последний приводит к недостатку окислителя в реакционной зоне, и, как следствие, к частичному пиролизу углеводородов.

Известно, что содержание первичного воздуха в смеси, при котором возникает прозрачное пламя, зависит не только от вида углеводородов, но и от условий смешения с вторичным воздухом, что обусловлено диаметром огневых каналов горелок (рис. 2.12). На границе и выше кривых пламя прозрачно, а ниже кривых имеет желтые язычки. Кривые показывают, что содержание первичного воздуха в смеси возрастает при увеличении числа углеродных атомов в молекуле и диаметра огневых каналов горелок. Коэффициент избытка первичного воздуха  $\alpha_1$  в смеси, при котором исчезают желтые язычки пламени, в зависимости от указанных факторов может быть определен для малых огневых каналов горелок:

$$\alpha_1 = 0,12 (m + n/4)^{0,5} (d_k/d_0)^{0,25}, \quad (2.45)$$

где  $m$  и  $n$  – число углеродных и водородных атомов в молекуле или среднее их число для сложного газа;

$d_k$  – диаметр огневых каналов горелки, мм;

$d_0$  – эталонный диаметр канала горелки, равный 1 мм.

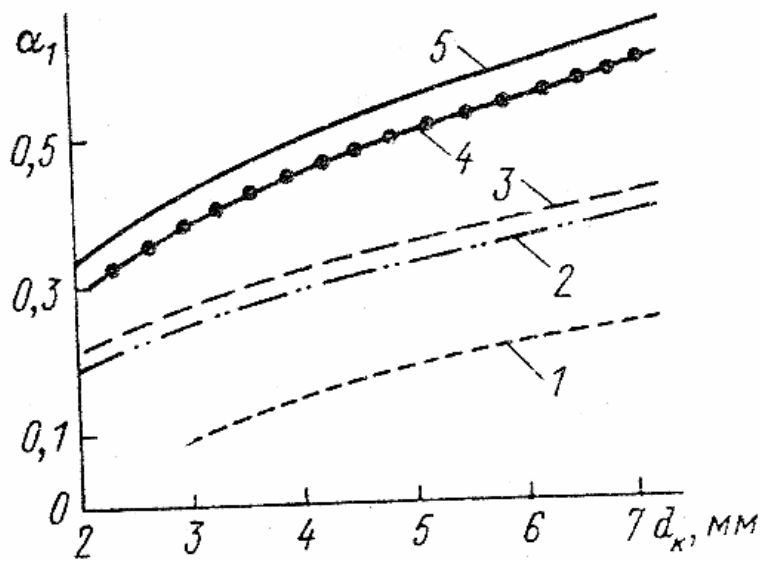


Рис. 2.12. Содержание первичного воздуха, при котором предотвращается образование желтых языков в пламени:  
 Газ: 1 – коксовый; 2 – природный газ месторождений;  
 3 – то же, нефтяных месторождений; 4 – пропан; 5 – бутан

Протекающие в пламени процессы свидетельствуют о том, что обеспечение полноты сгорания в практических условиях – задача достаточно сложная, так как зависит не только от принятого принципа сжигания газа, но и от условий развития пламени в топочном объеме. Наиболее высокие требования по полноте сгорания предъявляются к бытовым аппаратам и другим установкам, сбрасывающим продукты сгорания в окружающую атмосферу.

Вместе с тем полное сгорание газа в таких установках является наиболее трудным, так как связано с омыванием пламенем холодных теплообменных поверхностей. Для сжигания газа в бытовых плитах применяют инжекционные многофакельные горелки, образующие гомогенную смесь с коэффициентом избытка первичного воздуха  $\alpha_1 < 1$ . Недостающий для сгорания газа воздух поступает за счет диффузии из окружающей атмосферы.

На рис. 2.13 приведены схемы двух конфорочных горелок для бытовых газовых плит и усредненная концентрация оксида углерода CO в продуктах сгорания природного метана (95 об. %) и сжиженного углеводородного газа пропана (93 об. %) при работе горелок с номинальной тепловой мощностью. Различие горелок заключается в том, что к одной из них (рис. 2.13, а) вторичный воздух подводится только с периферии, а к другой (рис. 2.13, б) – как с периферии, так и из центрального канала.

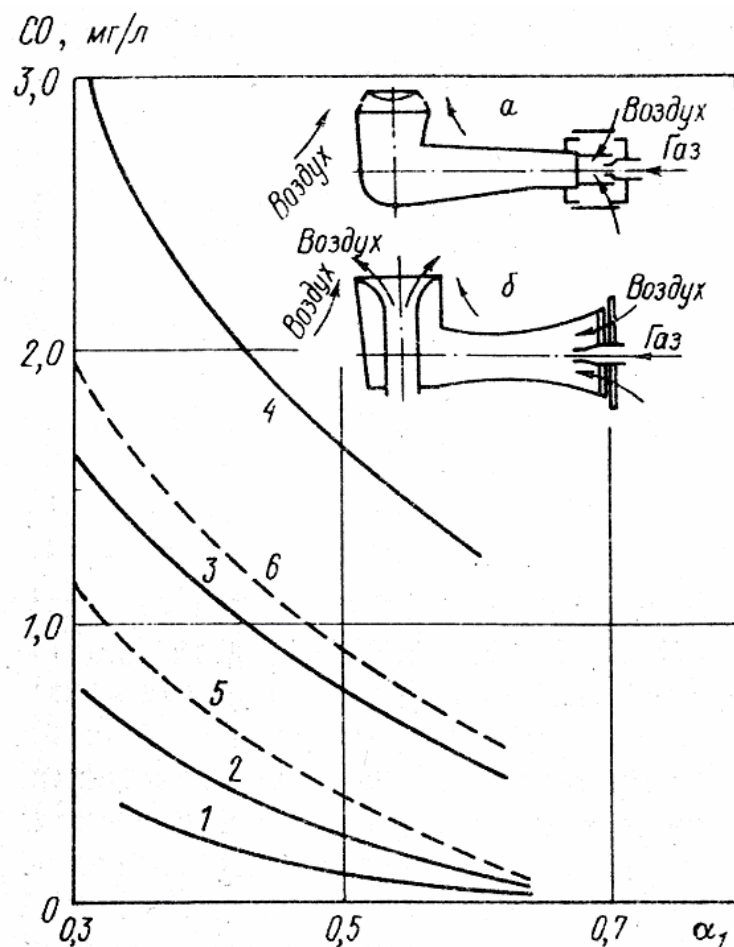


Рис. 2.13. Концентрация оксида углерода в продуктах сгорания в газовой плите:  
 а – горелка с периферийной подачей вторичного воздуха;  
 б – то же, с центральной и периферийной подачей вторичного воздуха;  
 1 – природный газ, горелка с периферийным подводом вторичного воздуха, расстояние до дна посуды 25 мм; 2–4 – то же, горелка с периферийным и центральным подводом вторичного воздуха, расстояние до дна посуды, мм; 2–25, 3–18, 4–10; 5 – сжиженный газ, горелка с центральным и периферийным подводом вторичного воздуха, расстояние до дна посуды 25 мм; 6 – то же, горелка с периферийным подводом вторичного воздуха

Анализ работы этих горелок показывает, что полнота сгорания газа зависит от коэффициента избытка первичного воздуха в смеси, расстояния от огневых каналов горелки до дна посуды, вида горючего газа, способа подвода вторичного воздуха. При этом увеличение содержания первичного воздуха в смеси, равно как и увеличение расстояния от горелки до дна посуды, приводит к снижению концентрации оксида углерода в продуктах сгорания для обоих типов газа и обоих типов горелок. Минимальная концентрация оксида углерода соответствует коэффициенту избытка первичного воздуха  $\alpha_1 = 0,6$  и выше и расстоянию от горелки до дна посуды 25 мм, а максимальная –  $\alpha_1 = 0,3$  и ниже и расстоянию от горелки до дна посуды 10 мм. Объясняется это следующим: 1) конусный фронт пламени, омывая днище посуды, охлаждается; 2) малое расстояние до дна посуды

затрудняет поступление вторичного воздуха и распределение его между факелами.

Анализ кривых указывает также на некоторое преимущество горелок с двухсторонним, периферийным и центральным, подводом воздуха, в особенности при сжигании сжиженных углеводородных газов. Так, если наименьшая концентрация оксида углерода в продуктах сгорания сжиженных углеводородов в горелках с двухсторонним подводом вторичного воздуха составляет 0,027 мг/л, то при тех же условиях в горелках с периферийным подводом вторичного воздуха она в 3 раза больше.

Проведенные в разные годы сотрудниками ЛИСИ, ВНИИпромгаза, ИГ АН УССР и другими исследования выявили также, что увеличение тепловой мощности горелок относительно номинальной на 15–20 % за счет повышения давления газа приводит к росту концентрации оксида углерода в продуктах сгорания в 1,2–1,3 раза, а за счет теплоты сгорания газа – в 1,5–2 раза. Объясняется это тем, что в последнем случае кратность эжекции, как правило, сохраняется неизменной, а это приводит к снижению содержания первичного воздуха в смеси относительно теоретически необходимого.

Значительный интерес представляет появление в процессе горения углеводородных газов ароматических соединений, полициклических, так как некоторые из них обладают канцерогенной активностью. Процесс их образования весьма сложен и изучен недостаточно. Вместе с тем выявлено наличие в продуктах незавершенного сгорания углеводородных газов не только простейшего ароматического соединения в виде бензола, но и полициклических ароматических соединений в виде бенз(а)пирена, безантрацена и др.

Образование многоядерных ароматических углеводородов протекает стадийно и вызывается предварительным появлением в пламени промежуточных соединений, преимущественно в виде ацетилена и его производных. Эти вещества при температуре в пламенной зоне претерпевают процессы удлинения цепи с перестройкой тройных углеродных связей на двойные. Образующиеся при этом диеновые углеводороды в результате циклизации и дегидратации приводят к появлению различных ароматических соединений, включая полициклические.

Данные табл. 2.15 показывают, что при сжигании природных газов с коэффициентом избытка первичного воздуха  $\alpha_1 = 0,6$  и выше на обоих типах горелок концентрация оксида углерода в продуктах сгорания отвечает требованиям ГОСТ. При этом повышение содержания первичного воздуха в смеси с 0,3–0,35 до 0,6–0,7 приводит к резкому снижению концентрации СО, а бенз(а)пирен не обнаруживается совсем или его концентрация ничтожна. При сжигании в тех же горелках и при тех же условиях сжиженных углеводородных газов (при любых значениях  $\alpha_1$ ) в продуктах сгорания обнаруживаются и оксид углерода, и бенз(а)пирен. При этом



наибольший выход этих компонентов наблюдается при сжигании газов с малым содержанием первичного воздуха в горелках с периферийным подводом вторичного воздуха. При сжигании же сжиженных углеводородных газов с высоким содержанием первичного воздуха в горелках с центральным и периферийным подводом вторичного воздуха концентрации бенз(а)пирена в продуктах сгорания, как правило, не превышает ПДК для атмосферного воздуха. Таким образом, горелки бытовых газовых аппаратов при их соответствии подаваемому газу не приводят к опасному загрязнению атмосферы канцерогенными веществами.

Т а б л и ц а 2 . 1 5

Средняя концентрация в продуктах сгорания оксида углерода и бенз(а)пирена в зависимости от вида газа, типа горелки и коэффициента избытка первичного воздуха (тепловая нагрузка горелки 1,86 кВт, расстояние от горелки до дна посуды 24–26 мм)

Тип горелки	Средняя концентрация	
	оксида углерода, мг/л (в пересчете на $\alpha = 1,0$ )	бенз(а)пирена, мкг/100 м <sup>3</sup>
1	2	3
<b>Природный газ</b>		
Горелка с периферийным подводом вторичного воздуха: при $\alpha_1 = 0,60 \dots 0,70$ при $\alpha_1 = 0,30 \dots 0,35$	0,1 1,2	Не обнаружен Следы
Горелка с центральным и периферийным подводом вторичного воздуха: при $\alpha_1 = 0,60 \dots 0,70$ при $\alpha_1 = 0,30 \dots 0,35$	0,05 0,12	Не обнаружен То же
<b>Сжиженный углеводородный газ</b>		
Горелка с периферийным подводом вторичного воздуха: при $\alpha_1 = 0,60 \dots 0,70$ при $\alpha_1 = 0,30 \dots 0,35$	0,3 1,2	0,03 1,1
Горелка с центральным и периферийным подводом вторичного воздуха: при $\alpha_1 = 0,60 \dots 0,70$ при $\alpha_1 = 0,30 \dots 0,35$	0,07 1,0	0,02 0,045

С целью выяснения условий образования оксида углерода и бенз(а)пирена при сжигании природного газа в разных условиях сотрудниками ЛИСИ, Ленгипроинжпроекта и Института онкологии были проведены исследования распространенных горелок, применяющихся в коммунальных установках. Газ сжигали в открытой атмосфере комнаты, а также в установленной в ней печи. Первыми исследовались инжекционные горелки низкого давления, аналогичные приведенным на рис. 2.7. Горелки имеют огневые каналы, расположенные в один-два ряда. Они работают с коэффициентом избытка первичного воздуха  $\alpha_1 = 0,6$ . Вторичный воздух поступает в реакционную зону за счет диффузии из окружающей атмосферы. Для обеспечения быстрого распространения пламени по всем огневым каналам и предотвращения их слияния расстояния между каналами должны быть определенного размера. Чрезмерное увеличение интервала между огневыми каналами приводит к невозможности самопроизвольного (без поджигания каждой струи) и быстрого распространения пламени. При этом особенно неустойчиво пламя перемещается в том случае, когда смесь газа с воздухом находится на грани отрыва. Чрезмерное уменьшение интервала между каналами приводит к слиянию пламени, затруднению поступления вторичного воздуха к каждому факелу в отдельности, увеличению высоты пламени и неполноте сгорания (химическому недожогу). Так, при сжигании природного газа с коэффициентом избытка первичного воздуха  $\alpha_1 = 0,6$  в горелке с однорядным размещением огневых каналов диаметром 4 мм при расстоянии между кромками, равном одному диаметру, концентрация оксида углерода в продуктах сгорания составляла 0,15–0,17 мг/л (в пересчете на  $\alpha = 1,0$ ), а бенз(а)пирена 0,5–0,1 мкг/100 м<sup>3</sup>. Сжигание газа в той же горелке в равнозначных условиях, но при расстоянии между кромками каналов, равном двум диаметрам, приводило к почти полному отсутствию как оксида углерода, так и бенз(а)пирена. При этом во втором случае пламя было прозрачным, а высота факелов была меньше, чем в первом случае.

Исследования показали, что расстояния между кромками огневых каналов, обеспечивающие быстрое распространение пламени и предотвращающие их слияние, зависят от их размера и содержания первичного воздуха в смеси, уменьшаясь с его увеличением.

Оптимальные расстояния между кромками каналов, обеспечивающие достаточную полноту сгорания газа и быстрое распространение пламени, приведены в табл. 2.16. При расположении огневых каналов в два ряда в шахматном порядке расстояния между кромками могут приниматься по этой же таблице. Расстояния между рядами при этом должны быть в 2–3 раза больше расстояний между каналами.

Т а б л и ц а 2 . 1 6

Расстояния между кромками огневых каналов инжекционных  
однорядных горелок в зависимости от их размеров  
и коэффициента избытка первичного воздуха

Диаметры огневых каналов, мм	Расстояния между кромками каналов, мм, при разных значениях коэффициента избытка первичного воздуха $\alpha_1$				
	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
2,0	11	8	6	5	4
3,0	15	12	9	7	5
4,0	16	14	11	9	7
5,0	18	15	14	12	10
6,0	20	18	16	14	12

Горелки инфракрасного излучения с металлической сеткой настраивались на коэффициент избытка первичного воздуха  $\alpha_1 = 1,05$  и устанавливались в комнате под углом от 45 до 90° к горизонту. Как показали исследования, при работе на номинальной тепловой мощности концентрация оксида углерода в продуктах сгорания – около 0,01 мг/л (в пересчете на  $\alpha = 1,0$ ), а бенз(а)пирен и другие углеводороды вообще не обнаружены. Анализ работы горелок в тех же условиях показал, что снятие металлической сетки не нарушило процесса сгорания газа. Наблюдаемое в практике эксплуатации излучающих горелок повышенное содержание вредных веществ в продуктах сгорания вызывается обычно несоответствием горелок подаваемому газу, чрезмерным повышением и в особенности снижением их тепловой мощности, а также неправильной установкой, при которой часть продуктов сгорания эжектируется внутрь смесителей.

Для изучения полноты сгорания газа в условиях, приближающихся к условиям работы промышленных установок, инжекционная горелка, аналогичная приведенной на рис. 2.6, устанавливалась на малогабаритной печи, размещенной в стендовой камере. Сжигание газа осуществлялось только за счет первичного воздуха ( $\alpha_1 = 0,70 \dots 1,15$ ), эжектируемого горелкой из окружающей печь атмосферы. Предотвращение воздействия на горение вторичного воздуха устранялось созданием в топке давления, превышающего давление в окружающем воздухе на 5...10 Па.

Обобщение многочисленных экспериментальных данных позволило получить усредненные кривые концентрации в продуктах сгорания различных компонентов, качественно и количественно характеризующих процесс горения (рис. 2.14). Как видно на рисунке, полное сгорание гомогенной газозооушной смеси достигается только при коэффициенте избытка первичного воздуха  $\alpha_1 = 1,05$  и выше. При уменьшении содержания воз-

духа в смеси, в особенности при  $\alpha < 1,0$ , сравнительно закономерно возрастает концентрация оксида углерода CO, ацетилена  $C_2H_2$ , этилена  $C_2H_4$ , пропилена  $C_3H_6$  и пропана  $C_3H_8$ , а также бенз(а)пирена  $C_{20}H_{12}$ . Примерно аналогично возрастает концентрация и не приведенных на графике компонентов: водорода, бензола и др.

Формальдегид обнаруживается в продуктах сгорания, прежде всего, при сжигании газа в установках малой мощности при общем или локальном недостатке воздуха. На образование формальдегида существенное влияние оказывает переохлаждение зоны горения потоками избыточного вторичного воздуха или соприкосновение с холодными поверхностями нагрева.

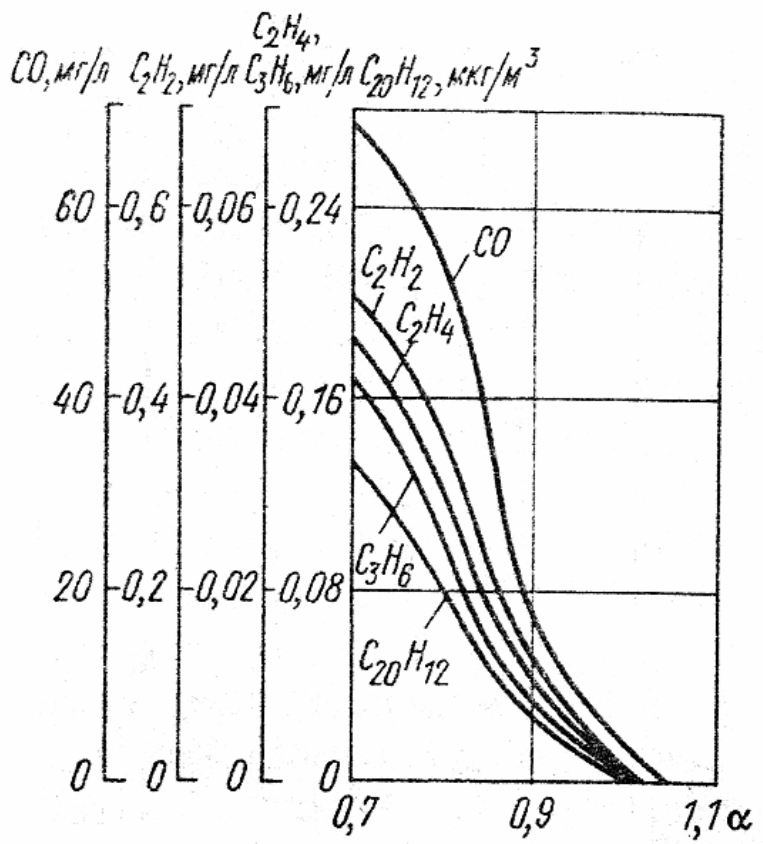
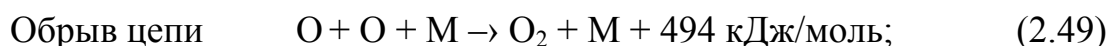
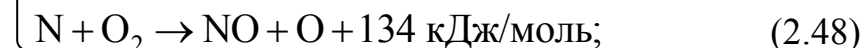
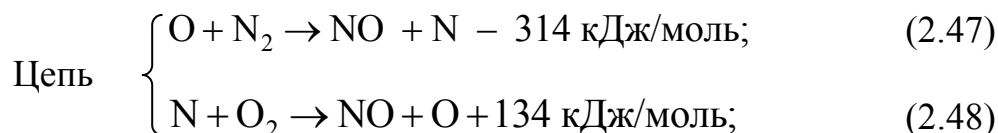
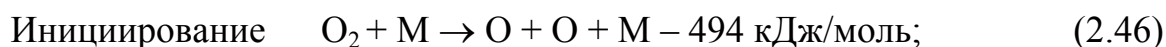


Рис. 2.14. Концентрация оксида углерода, ацетилена, этана, этилена и бенз(а)пирена в продуктах сгорания газа среднего давления в инжекционной горелке

Кроме рассмотренных выше продуктов незавершенного горения, при сжигании газа всегда образуются оксиды азота. В литературе отмечаются три источника их образования: "термические", "быстрые" и "топливные".

Образование "термических" NO (по Я.Б. Зельдовичу) идет по цепной схеме окисления азота, в которой активную роль играют свободные атомы кислорода и азота.

Начало цепной реакции связано с атомарным кислородом, возникающим в зонах высоких температур за счет диссоциации молекулярного кислорода:



Энергетический барьер реакции  $E$  складывается из энергии, требующейся на образование одного атома кислорода  $E_1$ , а также из энергии активации реакции атома кислорода с молекулой азота  $E_2$ :

$$E = E_1 + E_2 = 494/2 + 314 = 561 \text{ кДж/моль}.$$

Образование атомарного кислорода может происходить не только по реакции (2.46), но и за счет частичной диссоциации продуктов сгорания. При снижении температуры и наличии в продуктах сгорания кислорода часть образовавшегося оксида азота (1–3 об. %) окисляется до диоксида азота  $\text{NO}_2$ . Наиболее интенсивно эта реакция протекает после выхода оксида азота в атмосферу. Поэтому суммарный выход обозначают как  $\text{NO}_x$ .

Равновесная, максимально возможная при данной температуре концентрация оксида азота, об. %, может быть подсчитана по формуле

$$\text{NO}_p = 4,6e^{-21500/(RT)} / \sqrt{\text{O}_2\text{N}_2}, \quad (2.51)$$

где  $\text{NO}_p$  – равновесная концентрация оксида азота, об. %;

$R$  – универсальная газовая постоянная;

$T$  – абсолютная температура, К;

$\text{O}_2$  и  $\text{N}_2$  – концентрация, об. %, соответственно кислорода и азота.

Как показали многочисленные исследования, высокая концентрация оксида азота, соизмеримая с равновесной, возникает при сжигании газа в топках мощных теплонапряженных парогенераторов и в высокотемпературных мартеновских, коксовых и аналогичных печах, работающих на нагретом в регенераторах или в рекуператорах воздухе.

Сжигание газа в котлах малой и средней мощности, в небольших нагревательных и термических печах со значительным теплоотводом и малым временем пребывания компонентов в высокотемпературных зонах приводит к снижению выхода оксида азота в 10–15 раз в сравнении с равновесной концентрацией. Меньший выход объясняется высокой энергией активации реакции синтеза оксида азота.

Это требует значительного времени для достижения равновесия, в особенности при невысокой температуре в реакционных зонах. Так, для достижения равновесной концентрации оксида азота при температуре 1800 °С необходимо около 0,27, при 1700 °С – 1, при 1600 °С – 4, при 1500 °С – 23, при 1400 °С – 140 с. Отсюда следует, что чем короче время пребывания реагирующих компонентов в зоне высоких температур (меньших условиям равновесия), тем меньше оксида азота в продуктах сгорания.

Соотношение между действительной и равновесной концентрациями оксида азота

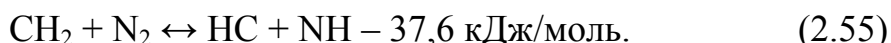
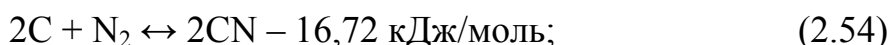
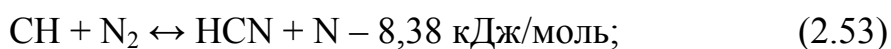
$$NO = NO_p \tau / \tau_p, \quad (2.52)$$

где  $\tau$  – время пребывания реагирующих компонентов в реакционных зонах, с;

$\tau_p$  – время образования равновесной концентрации в аналогичных условиях, с.

Итак, уменьшение оксидов азота в продуктах сгорания может достигаться за счет снижения температуры в реакционных зонах, уменьшения в них окислителя и сокращения времени пребывания реагирующих компонентов в зоне высоких температур.

Механизм образования «быстрых» NO предложен С. Фенимором. По его мнению, молекулярный азот связывается в топке не только с атомарным кислородом, но и с радикалами CH и CH<sub>2</sub> в реакциях с малыми энергетическими барьерами, например:



Установлено, что решающую роль в образовании «быстрых» NO играет радикал CH<sub>2</sub> (см. реакцию (2.55)). Образование NO происходит преимущественно по следующей реакции:



«Быстрые» NO образуются в начальной области фронта пламени в интервале температур 1000–1500 К. Выход «быстрых» NO при горении газа составляет 100–120 мг/м<sup>3</sup>.

«Топливные» NO образуются из азотсодержащих соединений топлива на начальном участке факела, в области образования «быстрых» NO, до образования «термических» NO. Выход «топливных» NO слабо зависит от температуры и не зависит от вида азотсодержащего соединения. Степень перехода азота топлива в NO составляет 20–30 %.

Применительно к факельному сжиганию природных и сжиженных газов образование оксидов азота идет, главным образом, по «термическому»

и «быстрому» механизмам. При этом «вклад» «термического» на порядок и более превышает «вклад» «быстрого» механизма. На выход оксидов азота влияет метод сжигания газа. Наиболее низким уровнем характеризуется метод беспламенного горения. Реализуется в горелках инфракрасного излучения, в зерновом слое огнеупора, в огнеупорных туннелях и у раскаленной огнеупорной поверхности, излучающей теплоту.

Зависимость выхода оксидов азота от коэффициента избытка воздуха имеет максимум при 15 % избытке воздуха. С увеличением или уменьшением избытка выход быстро уменьшается. При диффузионном горении соотношение расходов топлива и окислителя слабо влияет на выход оксидов азота. С увеличением мощности горелки и размеров топки выход увеличивается.

Из изложенного выше следует, что при решении вопросов газооборудования агрегатов и установок необходимо подбирать горелки, которые обеспечивают не только высокий КПД и низкое содержание продуктов неполного сгорания, но и низкий выход оксидов азота. Также снижению выброса оксидов азота способствуют следующие мероприятия:

- рассредоточение пламени за счет увеличения числа горелок или использования блочных горелок;
- равномерное распределение тепловых потоков в топке, экранирование топок и их разделение на отсеки двухсветными экранами;
- сокращение длины высокотемпературных туннелей и перемещение горения из них в топки;
- организация плоского факела пламени с увеличенной поверхностью теплоотдачи;
- ступенчатый подвод в реакционную зону воздуха;
- рециркуляция продуктов сгорания;
- подача воды или пара в зону горения и другие мероприятия, приводящие к снижению температуры и времени пребывания продуктов горения в зоне высоких температур. Остаточное содержание оксидов азота можно снизить путем применения методов и установок очистки продуктов сгорания перед выбросом их в атмосферу.

### **Контрольные вопросы**

1. Что понимается под теплотой сгорания газа?
2. Объясните балансовое уравнение горения любого углеводорода.
3. В чем суть цепного характера горения углеводородов?
4. Дайте определение теоретического и действительного количества воздуха, необходимого для горения.
5. Дайте определение коэффициента избытка воздуха в процессе горения.
6. Что понимается под действительной температурой горения?

7. Что понимается под температурой самовоспламенения?
8. Дайте определения пределам воспламеняемости (взрываемости) газозоооздушных смесей.
9. Что понимается под линейной, нормальной и турбулентной скоростью распространения пламени?
10. Дайте определения явлениям отрыва и проскока пламени.
11. Объясните принципы (методы) сжигания газов.
12. Объясните факторы, влияющие на выход продуктов неполного горения.
13. Какие вредные вещества образуются в продуктах сгорания газового топлива?
14. Какие факторы влияют на выход оксидов азота?
15. Объясните методы снижения вредных веществ в продуктах сгорания газового топлива.



## 3. ГАЗОВЫЕ ГОРЕЛКИ

### 3.1. Общие положения

Сжигание газа в коммунально-бытовых и промышленных установках производится при помощи газовых горелок. Газ сжигается в камерах горения (топках) или в воздушном пространстве. В общем случае основными функциями горелки являются:

- подача газа и воздуха в топку;
- смесеобразование, воспламенение, стабилизация факела при допустимых нагрузках;
- обеспечение требуемой интенсивности процесса горения газа с минимальным избытком воздуха и минимальных концентраций элементов химнедожога и вредных веществ в продуктах сгорания;
- обеспечение необходимой теплопередачи и максимального использования теплоты газового топлива.

Требования, предъявляемые к горелкам:

- создание условий для полного сгорания газа при заданной производительности с минимальным избытком воздуха и выходом вредных веществ в продуктах сгорания;
- устойчивая работа (без отрыва и проскока пламени) в необходимом диапазоне изменения тепловых нагрузок;
- пределы регулирования горелок и характеристики факела должны удовлетворять технологическим требованиям работы газоиспользующих установок;
- потери давления в горелках по воздушному и газовому тракту должны быть минимальными;
- уровень шума, создаваемого горелками, не должен превышать существующих санитарных норм (80 дБ);
- конструкция должна быть компактной, простой в изготовлении, удобной, надежной и безопасной в эксплуатации, обеспечивать удобство ремонта;
- возможность применения автоматики регулирования и безопасности;
- соответствие современным требованиям промышленной эстетики.

Большинство газовых горелок независимо от их типа имеет общие конструктивные элементы: устройство для подвода газа и воздуха, смесительную камеру, горелочный насадок и стабилизирующее устройство. В зависимости от типа горелки и технологических требований каждый из перечисленных выше элементов горелки может иметь различное конструктивное оформление. В некоторых конструкциях отдельные элементы могут совсем отсутствовать или компоноваться в одной детали.

В соответствии с ГОСТ 17356 горелка – устройство, обеспечивающее устойчивое сгорание топлива и возможность регулирования процесса горения. Газовая горелка – горелка, предназначенная для сжигания газообразного топлива.

*Основные термины и определения в области горелок,  
предназначенных для применения в топливоиспользующих установках*

*Горелка с ручным управлением* – горелка, в которой розжиг, изменение режима работы, наблюдение за ее работой и выключение выполняет обслуживающий персонал.

*Розжиг горелки* – процесс зажигания топлива, подаваемого в горелку.

*Полуавтоматическая горелка* – горелка, оборудованная автоматически действующими а) устройством её дистанционного розжига и б) системой контроля пламени.

*Автоматическая горелка* – горелка, оборудованная системами и устройствами, обеспечивающими её автоматический пуск (включающий продувку камеры горения газоиспользующей установки), перевод в рабочее состояние, контроль собственных параметров и параметров газоиспользующей установки, сигнализацию и выключение.

*Блочная горелка* – автоматическая горелка, скомпонованная с вентилятором воздуха для горения в единый блок.

*Комбинированная горелка* – горелка, предназначенная для отдельного или совместного сжигания газообразного и жидкого топлива.

*Горелка с принудительной подачей воздуха для горения* – горелка, в которую воздух для горения подается дутьевым устройством.

*Инжекционная горелка* – горелка, у которой одна из сред, необходимых для горения, инжектируется другой средой.

*Атмосферная горелка* – горелка, использующая воздух для горения из окружающей среды за счет диффузии или инжекции и диффузии.

*Излучающая горелка* – горелка, у которой основную долю излучения составляет излучение насадки, огнеупорных элементов и (или) прилегающих участков кладки.

*Основная горелка* – горелка, в которой сгорает все поступающее топливо или его основная часть.

*Запальная горелка* – горелка, предназначенная для розжига основной горелки.

*Стационарная запальная горелка* – запальная горелка, жестко соединенная с основной горелкой.

*Переносная запальная горелка* – запальная горелка, предназначенная для поочередного розжига нескольких основных горелок.

*Пилотная горелка* – стационарная запальная горелка, снабженная устройством розжига и системой контроля пламени, работающая в постоянном режиме.

*Автоматика горелки* – комплекс элементов, обеспечивающих пуск, регулирование, безопасную работу и выключение горелки, действующих автоматически.

*Программный блок горелки* – узел автоматики горелки, который реагирует на сигналы устройств регулирования и безопасности, выдает управляющие команды, контролирует последовательность пуска горелки, следит за работой горелки и вызывает её контролируемое и рабочее выключение.

*Система контроля пламени горелки* – система, включающая в себя устройство контроля пламени и управляемый этим устройством быстродействующий запорный топливный орган горелки.

*Запальное устройство горелки* – устройство, предназначенное для розжига горелки.

*Автоматический запорный топливный орган горелки* – запорный топливный орган горелки, управляемый автоматикой.

*Быстродействующий запорный топливный орган горелки* – автоматический запорный топливный орган горелки, закрывающийся за время не более 1 с при прекращении подачи энергии.

*Автоматический запорно-регулирующий топливный орган горелки* – орган горелки, осуществляющий открытие, перекрытие подачи топлива или изменение его расхода по сигналу, поступающему от системы автоматического регулирования горелки.

*Сопло горелки* – элемент горелки, в котором потенциальная энергия среды преобразуется в кинетическую энергию истекающей струи.

*Пропорционизатор* – автоматически действующее устройство, предназначенное для поддержания заданного соотношения «топливо – воздух» для горения в условиях изменяющейся тепловой мощности горелки.

*Камера горения горелки* – часть горелки, в которой происходит полностью или частично процесс горения.

*Отключенное состояние горелки* – состояние горелки, при котором основной запорный топливный орган горелки закрыт и вся энергия отключена.

*Пуск горелки* – перевод горелки из отключенного состояния в состояние готовности или в рабочее состояние.

*Розжиг горелки с проверенной искрой* – розжиг горелки, при котором включается подача топлива, после того как проконтролировано наличие искры.

*Розжиг горелки, проверенной запальной горелкой* – розжиг горелки, при котором включается подача основного топлива, после того, как проконтролировано наличие факела запальной горелки.

*Рабочее состояние горелки* – состояние, при котором все элементы горелки функционируют в соответствии с их назначением.

*Аварийное состояние горелки* – состояние, при котором отклонение контролируемых параметров выходит за недопустимые пределы вследствие возникающих дефектов элементов или систем либо нарушения функций горелки.

*Рабочее выключение горелки* – безопасное автоматическое выключение горелки при отклонении контролируемых параметров за допустимые пределы, при котором повторный пуск горелки осуществляется автоматически путем выключения и последующего включения энергии или обслуживающим персоналом вручную. Этот вид выключения в европейских странах получил название энергозависимого выключения.

*Защитное выключение горелки* – безопасное автоматическое выключение горелки при аварийном состоянии горелки, при котором повторный пуск горелки осуществляется только обслуживающим персоналом вручную. Этот вид выключения в европейских странах получил название энергонезависимого выключения.

*Безопасное выключение горелки* – прекращение подачи энергии к автоматическому запорному топливному органу горелки и выключение запорного устройства, осуществляемое при отклонении контролируемого параметра за допустимые пределы или при аварийном состоянии горелки и (или) топливоиспользующей установки.

*Контролируемое выключение горелки* – прекращение подачи энергии к автоматическому запорному топливному органу горелки, осуществляемое в результате действия устройств управления горелки.

*Продувка камеры горения топливоиспользующей установки* – принудительный ввод воздуха в камеру горения топливоиспользующей установки и газоходы с целью вытеснения оставшейся топливо – воздушной смеси и (или) продуктов сгорания.

*Время розжига горелки* – интервал времени от момента начала подачи топлива в горелку до момента появления сигнала о наличии пламени от устройства контроля пламени горелки.

*Тепловая мощность горелки* – количество теплоты, образующееся в результате сжигания топлива, подводимого к горелке в единицу времени:

$$Q_{\Gamma} = V Q_{\text{H}}, \quad (3.1)$$

где  $Q_{\Gamma}$  – тепловая мощность горелки, кВт;

$V$  – расход газа, м<sup>3</sup>/с ;

$Q_{\text{H}}$  – низшая теплота сгорания газа, кДж/ м<sup>3</sup>.

*Пусковая мощность горелки* – наименьшая тепловая мощность горелки, при которой происходит воспламенение топлива и обеспечивается стабильность пламени.

*Максимальная тепловая мощность горелки* – тепловая мощность горелки, составляющая 0,9 мощности, соответствующей верхнему пределу ее устойчивой работы.

*Номинальная тепловая мощность горелки* – наибольшая тепловая мощность горелки, при которой эксплуатационные показатели соответствуют установленным нормам.

*Минимальная тепловая мощность горелки* – тепловая мощность горелки, составляющая 1,1 мощности, соответствующей нижнему пределу ее устойчивой работы.

*Минимальная рабочая тепловая мощность горелки* – минимальная тепловая мощность горелки, при которой показатели ее работы соответствуют установленным нормам.

*Коэффициент предельного регулирования горелки* – отношение максимальной тепловой мощности горелки к ее минимальной тепловой мощности.

*Коэффициент рабочего регулирования горелки* – отношение номинальной тепловой мощности горелки к ее минимальной рабочей тепловой мощности.

*Диапазон регулирования тепловой мощности горелки* – регламентированный диапазон, в котором может изменяться тепловая мощность горелки во время эксплуатации.

*Предел устойчивости работы горелки* – предел работы горелки, при котором еще не возникает погасание, срыв, отрыв, проскок пламени и недопустимые вибрации. Существуют верхний и нижний пределы устойчивой работы горелки.

*Присоединительное давление топлива* – статическое давление топлива в топливопроводе непосредственно перед основным запорным топливным органом горелки.

*Присоединительное давление воздуха для горения* – статическое давление воздуха для горения в воздухопроводе непосредственно перед органом, регулирующим подачу воздуха в горелку.

*Максимальное (номинальное, минимальное рабочее, минимальное) давление воздуха для горения перед горелкой* – максимальное (номинальное, минимальное рабочее, минимальное) статическое давление воздуха для горения, измеренное после последнего по ходу воздуха регулирующего или запорного органа и соответствующее максимальной (номинальной, минимальной рабочей или минимальной) тепловой мощности горелки.

*Максимальное (номинальное, минимальное рабочее, минимальное) давление топлива перед горелкой* – максимальное (номинальное, минимальное рабочее, минимальное) статическое давление топлива, измеренное после последнего по ходу топлива регулирующего или запорного органа и

соответствующее максимальной (номинальной, минимальной рабочей или минимальной) тепловой мощности горелки.

*Максимальный (номинальный, минимальный рабочий, минимальный) объемный (массовый) расход топлива через горелку* – объемный (массовый) расход топлива через горелку, соответствующий максимальной (номинальной, минимальной рабочей, минимальной) тепловой мощности горелки.

*Объемный расход топлива через горелку* – объем топлива, проходящий в единицу времени через горелку.

*Давление в камере горения топливоиспользующей установки* – давление, измеренное в установленном сечении камеры горения топливоиспользующей установки, которое выше, равно или ниже атмосферного давления. Для горизонтальных камер горения установленным сечением считается сечение камеры горения на срезе горелки; для вертикальных камер горения с горизонтально расположенными горелками давление измеряется в верхней части камеры.

*Первичный воздух для горения* – часть воздуха для горения, подаваемого через горелку с целью предварительного смешения с топливом.

*Вторичный воздух для горения* – часть воздуха для горения, подаваемого через горелку или непосредственно в камеру горения топливоиспользующей установки.

*Третичный воздух* – часть воздуха, подаваемого через горелку или непосредственно в камеру горения топливоиспользующей установки, с целью разбавления продуктов сгорания и понижения их температуры.

*Повторный пуск горелки* – процесс, при котором не позднее чем через 1 с после погасания пламени в рабочем состоянии горелки выключается подача топлива и пуск горелки производится при выполнении программы пуска.

*Повторный розжиг горелки* – процесс, при котором не позднее чем через 1 с после погасания пламени в рабочем состоянии горелки включается запальное устройство без перерыва в подаче топлива. Если воспламенения не произошло, то горелка выключается по истечении времени защитного выключения подачи топлива при погасании пламени.

*Горелка с многоступенчатым регулированием тепловой мощности* – горелка, при работе которой регулятор расхода топлива может устанавливаться в нескольких положениях между максимальным и минимальным рабочими положениями.

*Горелка с трехступенчатым регулированием тепловой мощности* – горелка, при работе которой регулятор расхода топлива может устанавливаться в положениях «максимальный расход» – «минимальный расход» – «закрыто».

*Горелка с двухступенчатым регулированием тепловой мощности* – горелка, работающая в положениях "открыто – закрыто".

*Горелка с плавным регулированием тепловой мощности* – горелка, при работе которой регулятор расхода топлива может устанавливаться в любом положении между максимальным и минимальным рабочими положениями.

*Испытательный стенд горелки* – аттестованное оборудование, предназначенное для проверки горелки на соответствие техническим требованиям к ней.

*Камера горения испытательного стенда* – часть испытательного стенда горелки, в которой происходит горение топлива.

*Длина камеры горения испытательного стенда горелки* – расстояние между выходным сечением горелки или горелочного камня и выходным сечением камеры горения испытательного стенда горелки.

Полный перечень терминов и определений приведен в прил. 1.

Термины и определения общих понятий, связанных с рабочим процессом горелок, приведены в прил. 2.

### 3.2. Классификация и технические требования

Согласно ГОСТ 21204 газовые горелки классифицируют по:

- способу подачи компонентов;
- степени подготовки горючей смеси;
- скорости истечения продуктов сгорания;
- характеру потока, истекающего из горелки;
- номинальному давлению газа перед горелкой;
- возможности регулирования характеристик факела;
- необходимости регулирования коэффициента избытка воздуха;
- локализации зоны горения;
- возможности утилизации теплоты продуктов сгорания;
- степени автоматизации.

Классификация газовых горелок приведена в табл. 3.1.

Номинальная тепловая мощность каждой горелки должна соответствовать номинальной тепловой мощности, установленной для горелок данного типоразмера (предельные отклонения  $(+10) - (-5) \%$ ).

Коэффициенты рабочего регулирования горелки должны соответствовать значениям, приведенным в табл. 3.2.

Испытания горелок (в том числе для целей сертификации) – приемочные, квалификационные, периодические и типовые, а также испытания по предписаниям государственных органов надзора проводят испытательные центры горелочных устройств промышленного назначения, аккредитованные национальными органами по стандартизации.

Не допускается внесение монтажными и эксплуатационными организациями изменений в конструкцию горелки, прошедшей испытания и реко-

мендованной к применению, в случае, если они могут изменить её технические характеристики. Изменения допускается вносить в установленном порядке специализированным организациям, имеющим соответствующие лицензии.

Т а б л и ц а 3 . 1

Классификация газовых промышленных горелок (ГОСТ 21204)

Классификационный признак	Характеристика классификационного признака
1	2
Способ подачи компонентов	Подача воздуха за счет свободной конвекции
	Подача воздуха за счет разрежения в рабочем пространстве
	Инжекция воздуха газом
	Принудительная подача воздуха за счет давления газа (турбинные горелки)
	Принудительная подача воздуха от постороннего источника: дутьевые горелки с невстроенным вентилятором дутьевые горелки с встроенным вентилятором (блочные) инжекция газа воздухом
	Принудительная подача газозоудшной смеси от постороннего источника
Степень подготовки горючей смеси	Без предварительного смешения
	С частичной подачей первичного воздуха
	С неполным предварительным смешением
	С полным предварительным смешением
Скорость продуктов сгорания на выходе из горелки, м/с	До 20 (низкая)
	Свыше 20 до 70 (средняя)
	Свыше 70 (высокая, скоростные горелки)
Характер потока, истекающего из горелки	Прямоточный
	Закрученный неразомкнутый
	Закрученный разомкнутый
Номинальное давление газа перед горелкой, Па	До 5000 (низкое)
	Среднее давление (до критического перепада давлений)
	Высокое давление (критический и сверхкритический перепад давлений)
Возможность регулирования характеристик факела	С нерегулируемыми характеристиками факела
	С регулируемыми характеристиками факела
Необходимость регулирования коэффициента избытка воздуха	С нерегулируемым (минимальным или оптимальным) коэффициентом избытка воздуха
	С регулируемым (переменным или повышенным) коэффициентом избытка воздуха
Локализация зоны горения	В огнеупорном туннеле или в камере горения горелки
	На поверхности катализатора, в слое катализатора
	В зернистой огнеупорной массе
	На керамических или металлических насадках
	В камере горения агрегата или в открытом пространстве



Окончание табл. 3.1

1	2
Возможность использования тепла продуктов сгорания	Без подогрева воздуха и газа
	С подогревом в автономном рекуператоре или регенераторе
	С подогревом воздуха во встроенном рекуператоре или регенераторе
	С подогревом воздуха и газа
Степень автоматизации	С ручным управлением
	Полуавтоматические
	Автоматические

**Примечание.** Настоящую классификацию следует применять при составлении технического задания, анализе состояния газогорелочного парка, а также в технической, учебной и справочной литературе.

Таблица 3.2

Коэффициенты рабочего регулирования горелок (ГОСТ 21204)

Класс горелки по способу подачи воздуха и степени подготовки горючей смеси	Коэффициент рабочего регулирования $K_{р.р.}$ не менее
Горелки с принудительной подачей воздуха с полным предварительным смешением; инжекционные горелки с полным предварительным смешением	3
Горелки с принудительной подачей воздуха с неполным предварительным смешением	4
Горелки с принудительной подачей воздуха без предварительного смешения; горелки с подачей воздуха за счет разрежения без предварительного смешения; инжекционные горелки с частичной подачей первичного воздуха	5
Беспламенные панельные горелки	2

**Примечания:**

1. Указанные коэффициенты рабочего регулирования не относятся к блочным горелкам со ступенчатым регулированием, к запальным горелкам, к горелкам, предназначенным для газоиспользующих установок, не требующих указанных в таблице значений  $K_{р.р.}$  Значения коэффициента рабочего регулирования перечисленных горелок указывают в нормативных документах на конкретный тип горелки.

2. Коэффициенты рабочего регулирования горелок для котлов большой мощности (ГОСТ 28269) должны соответствовать требованиям к маневренности котлов.

Автоматические горелки должны работать при поддержании давления газа перед основным запорным органом с точностью от минус 15 до плюс 15 % номинального – для газа низкого давления (до 5кПа) и от минус 10 до плюс 10 % – для газа среднего давления (до 100 кПа).

В автоматических горелках должны выполняться следующие операции: пуск горелки по программе, зависящей от ее мощности (включая продувку камеры горения и дымоходов), перевод ее в рабочее состояние, регулирование тепловой мощности, контроль параметров безопасности горелки и газоиспользующей установки, выключение горелки при недопустимых отклонениях контролируемых параметров.

В автоматических горелках должны выполняться следующие операции: дистанционный розжиг горелки, контроль наличия пламени, выключение горелки при погасании контролируемого пламени.

В автоматических горелках пуск не следует осуществлять в следующих случаях:

- при отсутствии электроэнергии;
- при давлении газа за основным запорным органом на 30 % выше и ниже номинального значения;
- при недопустимых отклонениях контролируемых параметров газоиспользующей установки;
- при недостатке воздуха для горения (отключении дутьевого вентилятора, дымососа или отсутствии необходимого разрежения);
- при неполадках устройств продувки и отвода продуктов сгорания (отключение дутьевого вентилятора, дымососа или отсутствие необходимого разрежения);
- при сигнале о нарушении герметичности быстродействующего запорного топливного органа горелки или при сигнале об открытом положении автоматического органа утечки газообразного топлива.

В автоматических горелках не должна допускаться подача газа в основную горелку, пока не включено запальное устройство или не появилось пламя запальной горелки.

Автоматика должна обеспечивать защитное выключение горелки, если при ее розжиге не произойдет воспламенение топлива в течение не более: 5с – горелок тепловой мощностью до 50 кВт; 3с – горелок тепловой мощностью свыше 50 кВт.

У автоматических горелок в рабочем состоянии защитное выключение горелки должно обеспечиваться в следующих случаях:

- при погасании контролируемого пламени;
- при прекращении подачи электроэнергии;
- при повышении и понижении давления газа за основным запорным органом более чем на 30 % относительно номинального значения;
- при недопустимых отклонениях контролируемых параметров газоиспользующей установки;
- при недостатке воздуха для горения (отключении дутьевого вентилятора, дымососа или отсутствии необходимого разрежения);

– при неполадках устройств отвода продуктов сгорания (отключении дутьевого вентилятора, дымососа или отсутствии необходимого разрежения).

Пуск горелки после устранения причины, вызвавшей защитное выключение горелки, не должен быть самопроизвольным.

При защитном выключении автоматической горелки из-за прекращения подачи электроэнергии возобновление подачи энергии не должно вызывать самопроизвольного пуска горелки (за исключением блочных горелок с регулированием мощности 0 – 100 % номинальной, находящихся в рабочем состоянии, с выполнением полной программы пуска).

Устройство контроля пламени должно реагировать только на пламя контролируемой горелки и не должно реагировать на посторонние источники тепла и света (раскаленная футеровка, освещение и т.д.).

Система контроля пламени должна обеспечивать защитное выключение горелки, если произойдет погасание контролируемого пламени, при этом время защитного отключения подачи газа должно быть не более 2 с.

Для горелок номинальной тепловой мощностью до 0,1 МВт, устанавливаемых в камерах горения с разрежением и оснащенных системой контроля пламени, датчиками которой являются термочувствительные элементы, выполненные на базе термопар, дилатометров и т.п. и реагирующие на пламя пилотной горелки, время защитного отключения подачи газа в основную горелку при погасании пламени пилотной горелки не должно превышать 30 с.

Работоспособность автоматики горелок должна быть обеспечена при отклонениях питающего напряжения электрического тока от плюс 10 до минус 15 % номинального.

Полуавтоматические горелки и горелки с ручным управлением, входящие в состав автоматизированной газоиспользующей установки как комплектующие изделия, должны быть пригодны для работы с автоматикой этой установки.

Средний ресурс горелок до капитального ремонта (для ремонтируемых горелок) и до списания (для неремонтируемых горелок) должен быть по пожаростойкости не менее 18000 ч. Указанный ресурс не распространяется на быстроизнашиваемые элементы, автоматику горелки, а также на детали из огнеупорной керамики.

Вероятность безотказной работы устройства контроля пламени – не менее 0,92 за 2000 ч.

Горелки должны обеспечивать значения коэффициента избытка воздуха  $\alpha$ , приведенные в табл. 3.3, при номинальной тепловой мощности и выполнении требований по предельным концентрациям оксида углерода и оксидов азота в сухих продуктах сгорания (табл. 3.4). Допускаемое увеличение коэффициента избытка воздуха в диапазоне рабочего регулирования

мощности (за исключением пусковых режимов) не должно превышать 0,2. Требования не распространяются на горелки, предназначенные для работы с переменным или повышенным избытком воздуха.

Т а б л и ц а 3 . 3

Требуемые значения коэффициента избытка воздуха различных горелок при номинальной тепловой мощности (ГОСТ 21204)

Класс горелки по способу подачи воздуха, степени подготовки горючей смеси и назначению	Коэффициент избытка воздуха $\alpha$
Горелки с принудительной подачей воздуха с полным предварительным смешением; инжекционные горелки с полным предварительным смешением	$\leq 1,05$
Горелки с принудительной подачей воздуха с неполным предварительным смешением	$\leq (1,05-1,10)^*$
Горелки с принудительной подачей воздуха без предварительного смешения; горелки с подачей воздуха за счет разрежения без предварительного смешения	$\leq (1,05-1,15)^{**}$
Горелки для паровых котлов большой мощности (независимо от способа подачи воздуха и степени подготовки горючей смеси):	
газовые и газомазутные	$\leq 1,05$
пылегазовые	$\leq 1,10$
горелки при организации в топке котла ступенчатого сжигания топлива	$\leq 1,10$

\* Указанный диапазон учитывает различную степень смешения.

\*\* Указанный диапазон учитывает различную скорость смешения в факеле за счет разности скоростей.

Т а б л и ц а 3 . 4

Предельные значения концентрации оксида углерода в сухих продуктах сгорания в диапазоне рабочего регулирования горелок (ГОСТ 21204)

Условия работы (испытаний) горелок	Место отбора проб	Температура продуктов сгорания, °С, не более	СО ( $\alpha = 1,0$ ) % об.
Газоиспользующая установка (испытательный стенд)	На выходе из камеры горения газоиспользующей установки (испытательного стенда)	1400	0,05
Открытый воздух	В контрольном сечении за видимой длиной факела		0,01

**П р и м е ч а н и е .** Допускается определять место отбора проб на газоиспользующей установке (испытательном стенде) таким образом, чтобы при разбавлении продуктов сгорания воздухом, поступающим в газовый тракт установки вследствие присосов, концентрации компонентов смеси, образовавшейся в месте отбора пробы, не выходили за пределы порога чувствительности применяемого газоанализатора.

Потери теплоты от химической неполноты сгорания, определенные на основании анализа проб продуктов сгорания, в диапазоне рабочего регулирования горелки не должны быть более 0,4 %.

Конструкции горелок с принудительной подачей воздуха должны быть выполнены из материалов, допускающих работу на подогретом воздухе с температурой не менее 300°C.

Сопла, завихрители и другие детали, засоряющиеся во время работы, должны быть доступны для очистки и замены без демонтажа горелок.

Конструкция горелок и входящих в них разъемных соединений должна исключать возможность их неправильной сборки и самопроизвольного смещения или разъединения деталей, а также должна предусматривать возможность визуального контроля пламени. Допускается визуальное наблюдение за пламенем через смотровые отверстия камеры горения газосжигающего агрегата.

Горелки, предназначенные для камер горения, работающих под разрежением, должны обеспечивать устойчивое горение при разрежении, превышающем паспортные данные в 1,2 раза при разрежении свыше 50 Па и в 1,5 раза при разрежении до 50 Па включительно.

Горелки, предназначенные для камер горения с избыточным давлением, должны обеспечивать устойчивое горение при противодавлении, превышающем паспортные данные в 1,2 раза при давлении свыше 50 Па и в 1,5 раза при давлении до 50 Па включительно.

Блочные горелки, предназначенные для работы при разрежении в камере горения, должны устойчиво работать при избыточном давлении до 10 Па, а предназначенные для работы при избыточном давлении должны устойчиво работать при разрежении до 10 Па.

На каждой горелке должна быть прикреплена табличка, содержащая:

- наименование или товарный знак предприятия – изготовителя;
- условное обозначение типоразмера;
- номинальную тепловую мощность горелки;
- электрическое напряжение;
- силу электрического тока;
- степень электрозащиты;
- порядковый номер горелки по системе нумерации предприятия-изготовителя;
- дату изготовления;
- обозначение стандарта или технических условий.

Предельно допустимые шумовые характеристики устанавливаются в соответствии с табл. 3.5. Если значения шумовых характеристик горелок превышают значения, установленные в табл. 3.5, то допускается устанавливать технически достижимые значения шумовых характеристик по ГОСТ 12.1.003.

Таблица 3.5

## Допустимые уровни звукового давления и уровни звука (ГОСТ 21204)

Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц									Уровень звука и эквивалентный уровень звука, дБа
31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	80
107	95	87	82	78	75	73	71	69	

Электрическое оборудование горелки должно питаться от одного источника электроэнергии и выключаться при помощи одного выключателя.

Горелки номинальной мощностью свыше 0,12 МВт должны разжигаться запальным устройством или запальной горелкой (переносной или стационарной). Мощность запальной горелки должна быть не более 5 % номинальной мощности основной горелки, но не превышать 0,12 МВт. Автоматические и полуавтоматические горелки, пусковая мощность которых превышает 0,4 МВт, должны быть оснащены стационарной запальной горелкой.

Горелки должны быть оборудованы штуцерами для присоединения приборов, измеряющих давление газа перед горелкой, а горелки с принудительной подачей воздуха – дополнительно штуцерами для присоединения приборов, измеряющих давление воздуха перед горелками (или в корпусе горелки). Штуцера могут быть установлены на трубопроводах, принадлежащих непосредственно горелке, и на подводящих трубопроводах. Во всех случаях штуцера располагают после последнего по ходу газа (воздуха) запорного или регулирующего органа. Измерение давления газа допускается заменять измерением расхода газа.

На трубопроводе, подводящем газ к горелке или группе горелок, должен быть предусмотрен основной запорный топливный орган горелки, установленный на удобном для обслуживания месте и снабженный указателем положений «открыто» и «закрыто», если его конструкция не позволяет определить эти положения без указателя.

### 3.3. Примеры горелок

Многообразие газосжигающих коммунально-бытовых установок и ограниченность объема учебного пособия не позволяют рассмотреть абсолютное большинство конструкций применяемых и вновь разработанных горелок. Поэтому ограничимся рассмотрением наиболее характерных.

Газовая плита – бытовой газовый прибор. Самое широкое распространение получили напольные газовые плиты с духовым шкафом. Они содержат от 2 до 4 горелок стола и горелку духового шкафа. На рис. 3.1

представлена конструкция унифицированной горелки стола бытовой плиты Казанского завода газовой аппаратуры .

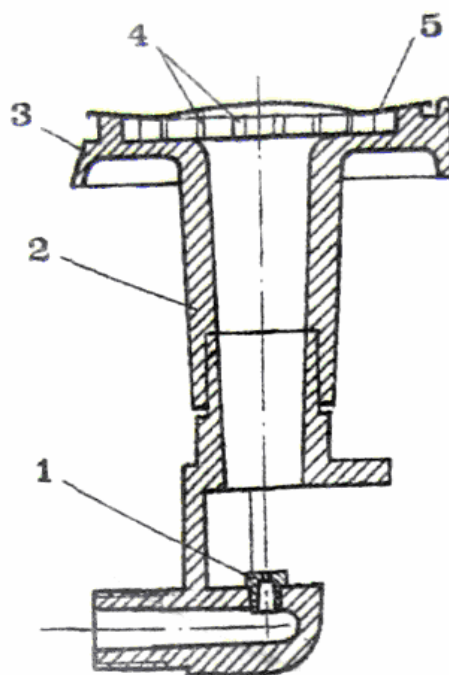


Рис. 3.1. Горелка бытовой газовой плиты:  
1 – сопло; 2 – смеситель; 3 – головка; 4 – огневые каналы; 5 – крышка

Горелка содержит сопло 1, эжекционный смеситель 2, головку 3 с огневыми каналами 4 и крышку 5. Первичный воздух поступает за счет кинетической энергии струи газа, истекающей из сопла 1. Вторичный воздух подводится из атмосферы непосредственно в зону горения. Крышка 5 имеет по окружности отбортовку (буртик), благодаря которой при горении создается верхнее стабилизирующее пламя и обеспечивается беглость огня, то есть передача горения от одного огневого канала другому. Кроме того, буртик предохраняет пламя горелки от заливания жидкостью.

На рис. 3.2 приведена инжекционная горелка, широко применяемая в проточных водонагревателях. Особенность ее – наличие двух смесителей, присоединенных к общему распределительному коллектору. Газ в каждый смеситель подается через три сопла, что обеспечивает образование однородной газозвушной смеси на коротком пути. Распределитель из алюминиевого сплава имеет 13 трубок со щелевыми отверстиями вдоль оси каждой трубки в два ряда. Щели для выхода смеси образованы за счет вырезов в стальных штампованных пластинах, вставляемых в верхнюю часть литых трубок.

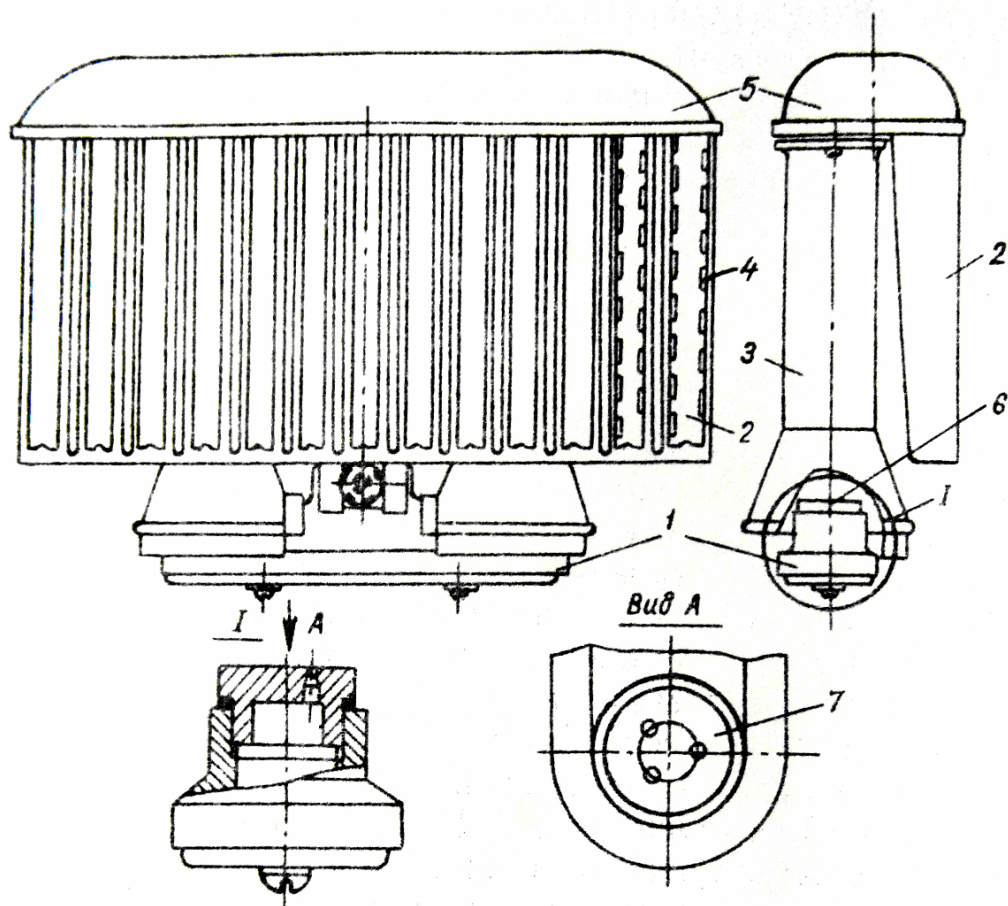


Рис. 3.2. Инжекционная горелка для проточных водонагревателей:  
 1 – крышки; 2 – распределительные трубки; 3 – смеситель; 4 – огневые щели;  
 5 – распределительный коллектор; 6 – диск с тремя соплами; 7 – сопло

Стальная поверхность распределительных трубок обеспечивает необходимую термостойкость горелки, работающей в условиях высокого теплового напряжения топочного объема водонагревателя.

Горелка предназначена для сжигания природных и сжиженных углеводородных газов с коэффициентом избытка первичного воздуха  $\alpha_1 \approx 0,6$ . Устойчивость горения в отношении отрыва достигнута за счет малых скоростей вылета смеси и взаимного поджигающего действия пламени, а в отношении проскока – докритическим сечением щелей, ширина которых 1,2 мм. Подобные горелки могут применяться в кипятильниках, дистилляторах, варочных котлах и других установках с близкой тепловой мощностью.

На рис. 3.3 показана инжекционная горелка для емкостного водонагревателя АГВ – 120. Она изготавливается литой из чугуна и предназначена для сжигания природных и сжиженных углеводородных газов. Горелка может использоваться в любых других установках, если она достаточна по тепловой мощности и пригодна по габаритным размерам и форме.



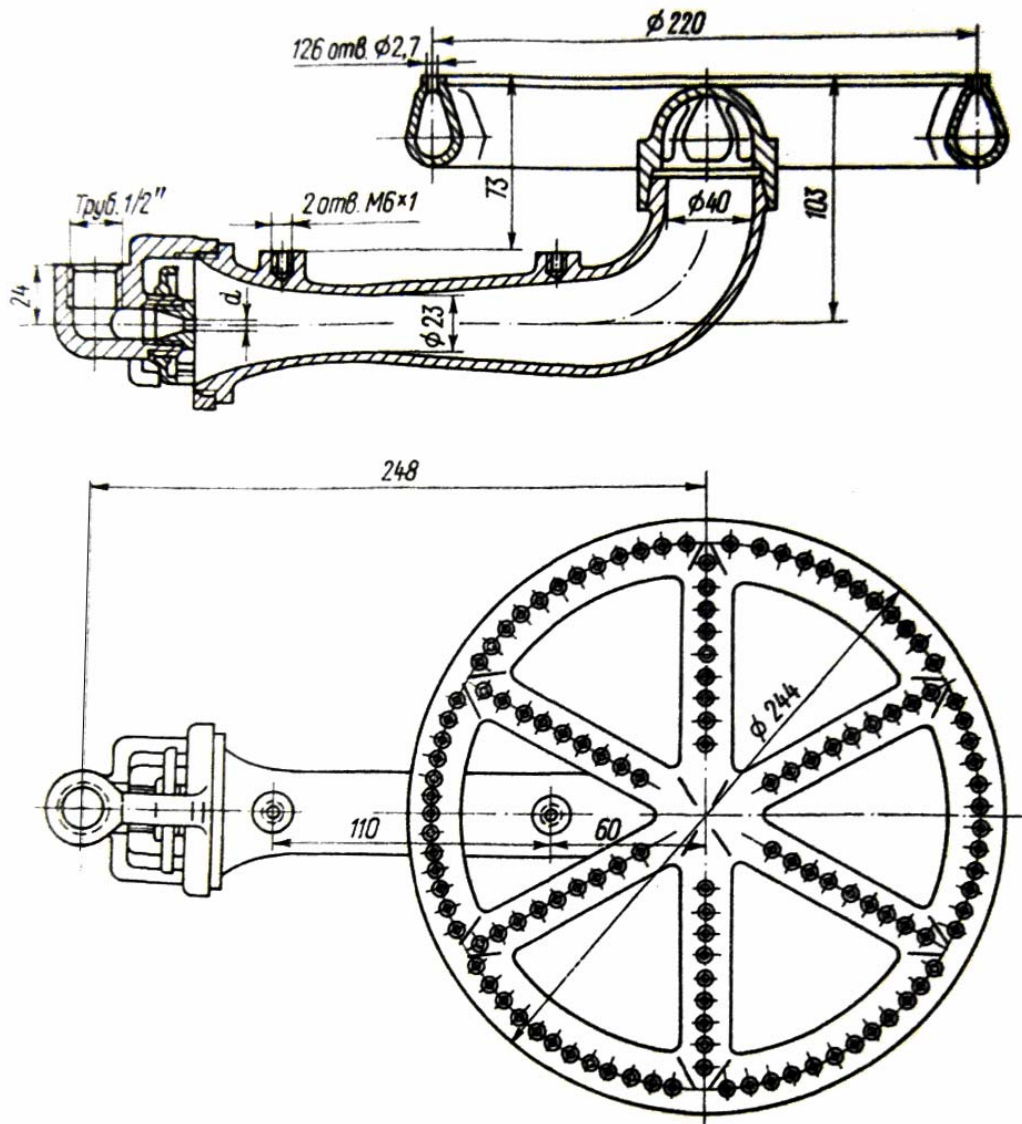


Рис.3.3. Инжекционная горелка для водонагревателя АГВ – 120

На рис. 3.4 приведена инжекционная горелка УГОП-П-16 для отопительных бытовых печей. При работе горелки газ под давлением при нажатой кнопке 18 клапана 1 подается через сопло 17 в запальную горелку 15 и зажигается. Под воздействием пламени запальной горелки термодатчик 14 нагревается, удлиняется и перемещает рычаг 3, который фиксирует кнопку 18 во включенном состоянии и клапан 1 в открытом состоянии. При этом запальная горелка 15 находится в работе и газ через клапан 1 подается к крану 4. Открытием крана 4 газ подается через сопла 6 (два сопла) в основную горелку 16 (две горелки). Газ, истекая из сопла 6 через открытый регулятор подачи воздуха 7, инжектирует первичный воздух из атмосферы в основную горелку 16, где образуется горючая смесь. Смесь, истекая из огневых отверстий основной горелки 16, сгорает в потоке вторичного воздуха, который поступает из поддувала топливника печи.

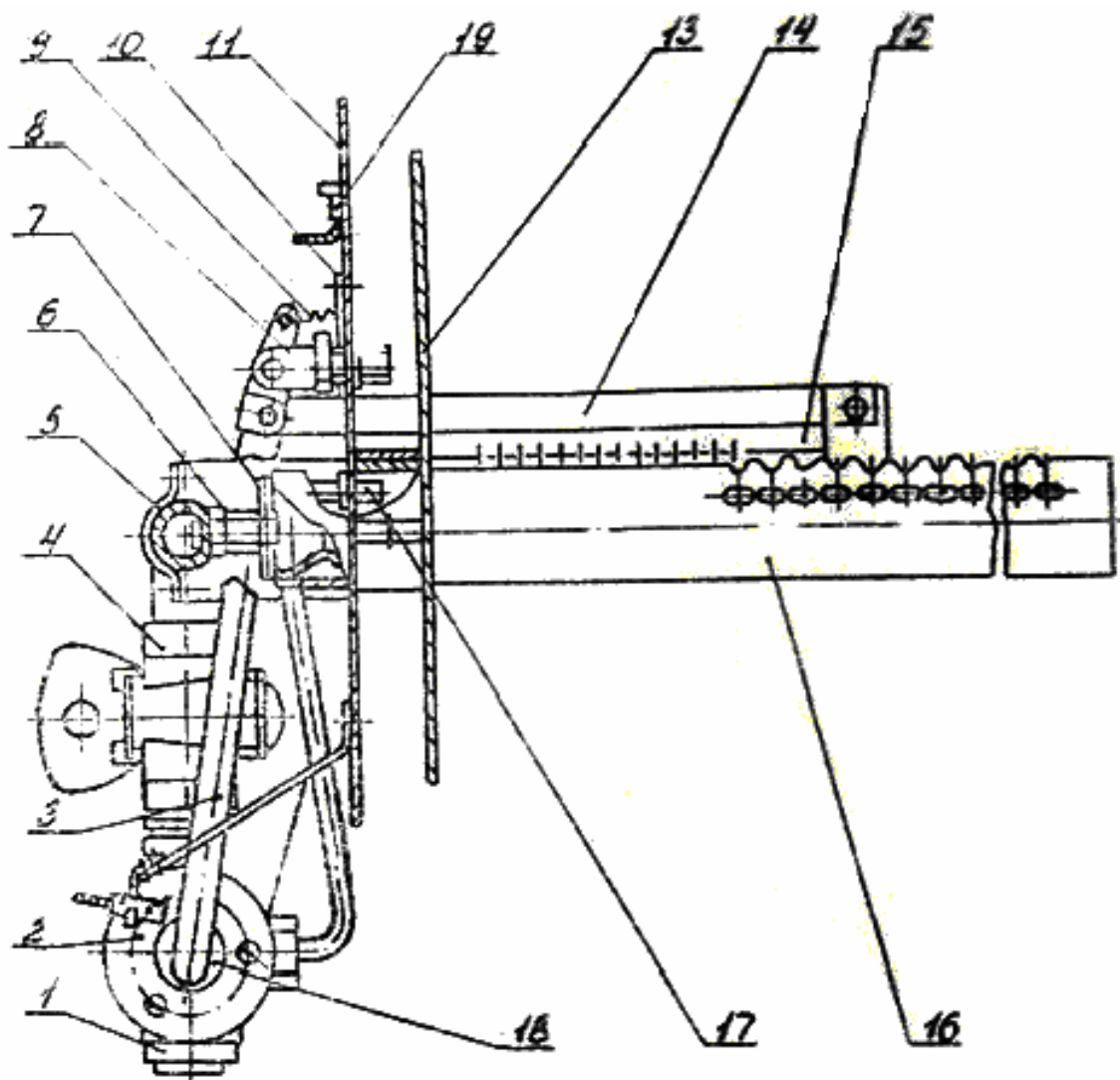


Рис. 3.4. Горелка для отопительных бытовых печей:  
 1 – клапан; 2 – кронштейн; 3 – рычаг; 4 – кран; 5 – газораспределитель;  
 6 – сопло основной горелки; 7 – регулятор подачи воздуха; 8 – винт регулировочный; 9 – пружина; 10 – заслонка; 11 – щиток фронтальный;  
 13 – отражатель; 14 – термодатчик; 15 – горелка запальная;  
 16 – горелка основная; 17 – сопло запальной горелки; 18 – кнопка;  
 19 – устройство безопасности

При прекращении подачи газа в клапан, при понижении давления ниже допустимого прекращается работа запальной горелки 15, охлаждается термодатчик 14, смещается с кнопки 18 рычаг 3, выключается клапан 1 и прекращается подача газа в горелку. При работающей горелке, в случае нарушения тяги в дымоходе, вторичный воздух из поддувала печи к запальной 15 и основной 16 горелкам не подается, запальная горелка 15 тухнет, термодатчик 14 охлаждается, рычаг 3 с кнопки 18 смещается, клапан 1 выключается и прекращает подачу газа на запальную 15 и основную 16 горелки.

Для повышения надежности отключения горелки при нарушении тяги в дымоходе, в конструкции горелки предусмотрено устройство безопас-

ности 19. В случае нарушения тяги продукты сгорания через отверстия в отражателе 13 и щитке фронтальном 11 начинают поступать в помещение и нагревают термобиметаллическую пластину устройства безопасности, которая освобождает толкатель, размещенный в цилиндре устройства безопасности. Толкатель ударяет по рычагу 3, клапан 1 выключается и прекращает допуск газа к горелкам.

При срабатывании устройства безопасности, повторный розжиг горелки возможен только после восстановления тяги в дымоходе и взведении устройства безопасности с помощью серьги, укрепленной в верхнем правом углу щитка фронтального 11.

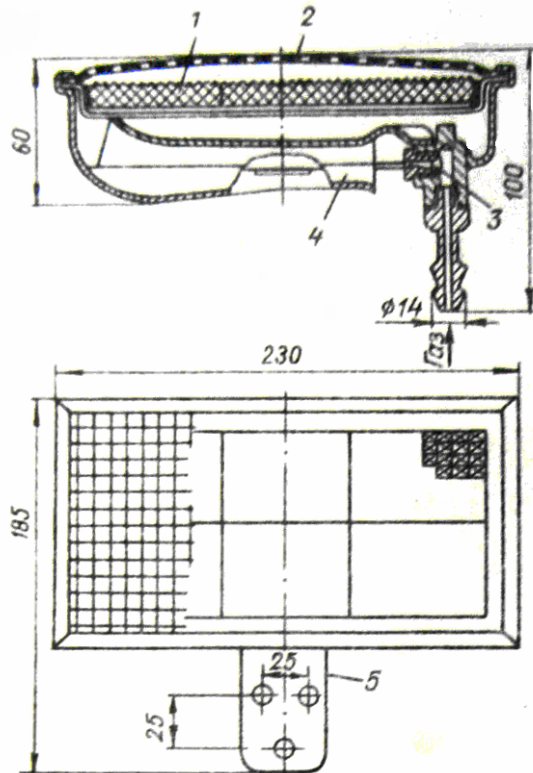
На рис. 3.5 приведены горелки инфракрасного излучения «Звездочка» и «Унифицированная». Их особенностью является способность передачи большей части выделяемой теплоты за счет излучения раскаленной насадки (излучателя). Температура разогрева излучателя колеблется в пределах 700–950 °С. Газ сгорает без видимого факела на насадке. Первичный воздух должен подаваться в количестве, необходимом для полного сжигания газа ( $\alpha_1 = 1,05 \dots 1,1$ ).

Горелки инфракрасного излучения «Звездочка» и «Унифицированная» предназначены для отопления производственных помещений, сушки строящихся зданий, обогрева отдельных предметов, тепловой обработки материалов. При их использовании необходимо обеспечить эффективную и надежную вентиляцию помещений. В противном случае, из-за снижения доли кислорода в воздухе, подаваемом на горение, горелки становятся источником выделения продуктов неполного горения, в том числе оксида углерода.

Подовые горелки наиболее широко применяют в чугунных секционных котлах, в других котлах малой мощности, в небольших печах и сушилах. На рис. 3.6. показана подовая однорядная низкого давления без принудительной подачи воздуха горелка конструкции Укринжпроекта. Газ через отверстия в коллекторе струйками выходит в щель, равномерно распределяясь по её длине. Воздух для горения поступает в ту же щель снизу и перемешивается с газом. В щели начинается горение, она раскаляется и обеспечивает стабилизацию факела. При нормальной работе газ горит на некотором расстоянии (20–40 мм) от коллектора, который должен располагаться строго по оси щели. Смещение коллектора или его коробление нарушает равномерность распределения воздуха, и факел вытягивается.

Температура коллектора при тщательной наладке составляет около 350–400 °С. Температура поверхности щели достигает 900–1200 °С. Горелка требует достаточной высоты топки, так как длина факела может быть в пределах 800–1500 мм.

а



б

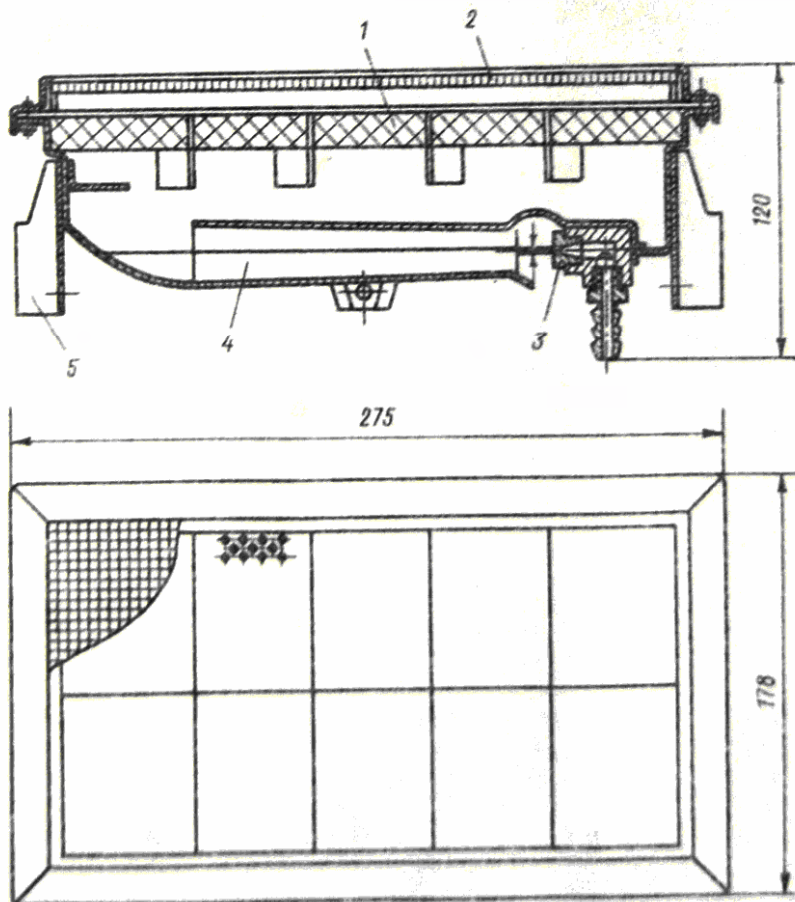


Рис. 3.5. Горелки инфракрасного излучения «Звездочка» (а) и «Унифицированная» (б): 1 – излучатель керамический; 2 – сетка-экранный; 3 – сопло; 4 – смеситель; 5 – кронштейн

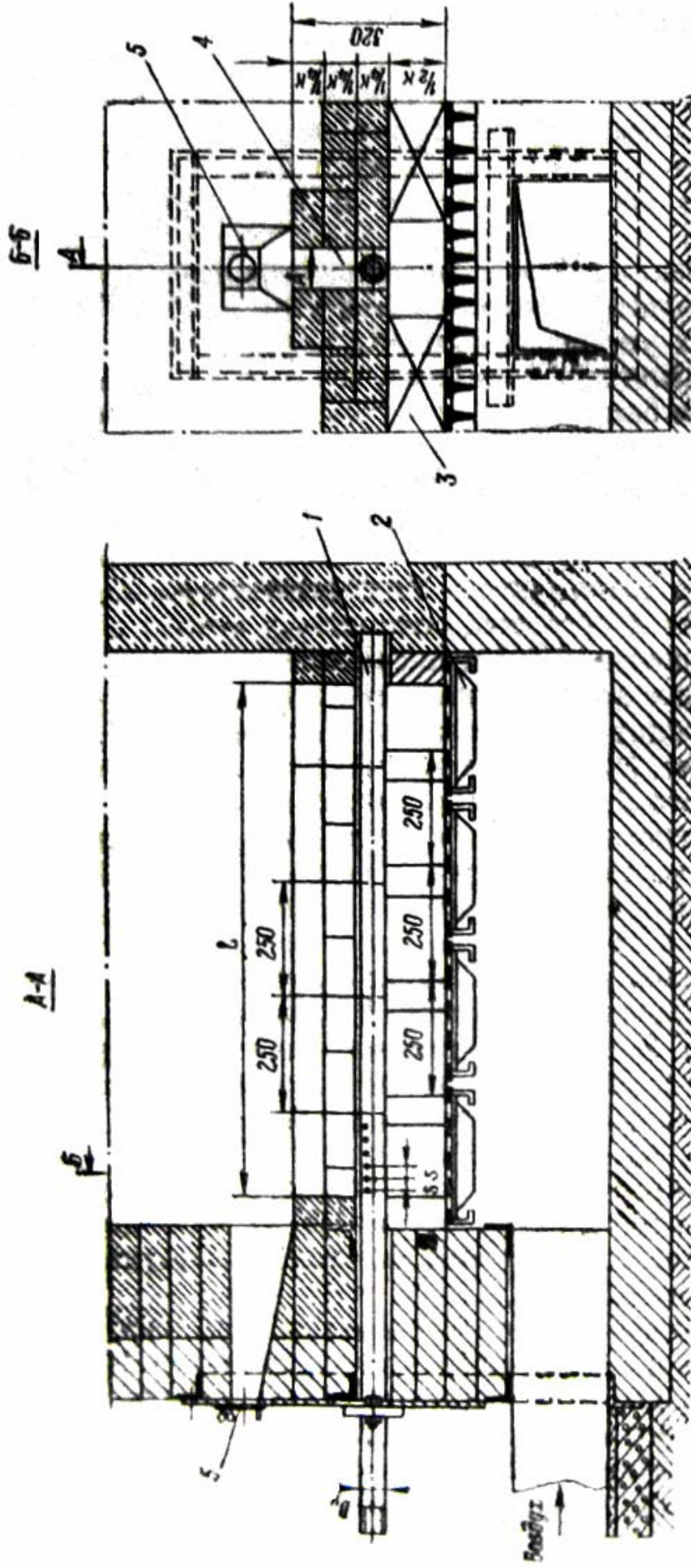


Рис. 3.6. Подовая горелка конструкции У кринжпроекта:  
 1 – газовый коллектор; 2 – колосники; 3 – кирпич; 4 – щель из огнеупорного кирпича;  
 5 – окно для розжига и наблюдения за горением

На рис. 3.7. приведена инжекционная горелка ИГК конструкции Мосгазниипроекта. Предназначена для сжигания газа в топках чугунных секционных котлов и других агрегатов, работающих под разрежением. В горелке конец смесителя имеет насадок с пластинчатым стабилизатором, состоящим из стальных пластин, скрепленных между собой на расстоянии 1,4–1,6 мм. Такое расстояние между пластинами предотвращает проскок, а устойчивость в отношении отрыва обеспечивает наличие стяжных болтов, создающих обратные токи горячей газовойдушной смеси. При полностью открытой воздушной заслонке горелка зажигается спокойно и сразу может работать на любом режиме без прогрева. Недостаток – опасность перегрева и деформации пластин стабилизатора за счет излучения раскаленной кладки топки или пламени работающих горелок.

На рис. 3.8. приведены инжекционные горелки БИГ конструкции Промэнергогаза. По результатам государственных испытаний рекомендованы для котлов и других агрегатов, работающих под разрежением 5–30 Па. Конструкция горелок обусловлена стремлением сократить длину, уменьшить звуковое давление и увеличить диапазон регулирования нагрузки. Горелка состоит из нескольких цилиндрических инжекционных смесителей, объединенных в один блок общим газораспределительным коллектором (газовой камерой). Подвод газа в каждый смеситель осуществляется четырьмя периферийными соплами, выполненными в виде косых сверлений в стенках смесителей под углом  $25^\circ$  к их оси.

Достоинством периферийного подвода газа является то, что при этом осуществляется осевой вход воздуха при минимальных аэродинамических сопротивлениях и обеспечивается удобный визуальный осмотр пламени в туннеле и топке при эксплуатации. Незначительные габаритные размеры позволяют установку горелок в стенках топки, что обеспечивает компактность газового оборудования агрегатов.

Стабилизация пламени обеспечивается прямоугольным керамическим туннелем длиной 100 мм. Горелки БИГ не имеют воздушных заслонок и обеспечивают полное сгорание газа в рабочем режиме при  $\alpha_1 = 1,02 - 1,05$ . Наблюдение за горением газа и розжиг горелок можно осуществлять через открытые торцы смесителей.

На рис. 3.9 приведена горелка ГНП конструкции Теплопроекта. Предназначена для сжигания газа в нагревательных и термических печах, сушилках, туннельных печах промышленности стройматериалов и других установках. Она может работать как на холодном, так и на нагретом до  $400^\circ\text{C}$  воздухе. Для получения пламени разной длины и светимости горелки ГНП оборудуются много- или одноструйными соплами и лопатками для закрутки воздуха.

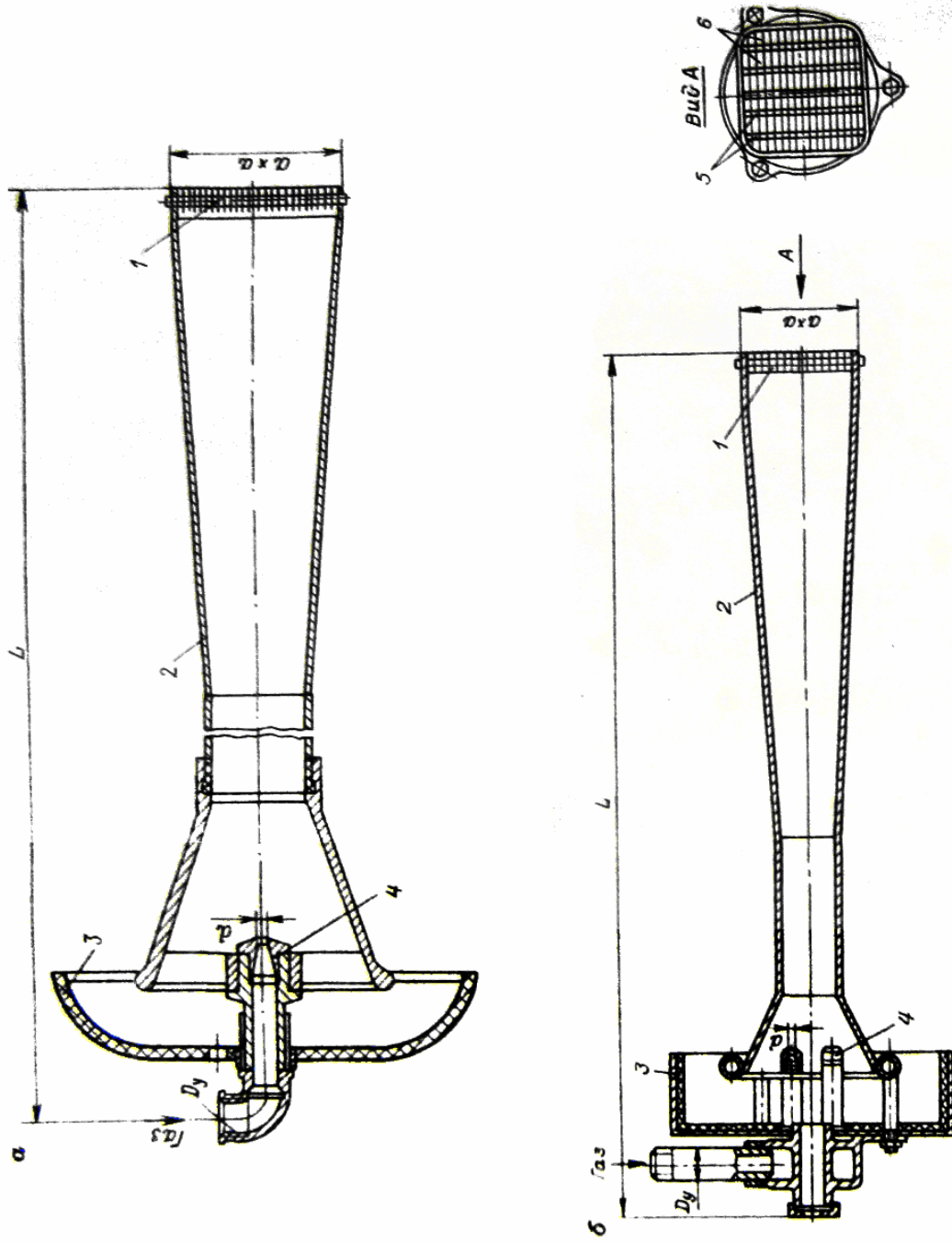


Рис. 3.7. Инжекционные горелки ИГК конструкции Мосгазниипроекта:  
 а – односопловая; б – четырехсопловая; 1 – пластинчатый стабилизатор; 2 – смеситель; 3 – воздушная заслонка; 4 – сопло;  
 5 – стержни, предотвращающие отрыв; 6 – пластины, предохраняющие от проскока





При сжигании природного газа с  $\alpha_1 = 1,05$  и выпуске его в закрученный поток воздуха через 4–6 сопел, расположенных под углом  $45^\circ$  к оси горелки, возникает сравнительно прозрачный пламя. При выпуске равнозначного количества газа в закрученный поток воздуха через одноструйное осесимметричное сопло характер пламени изменяется сравнительно мало, но горение завершается на несколько большей длине.

Достоинством этих горелок является широкий диапазон регулирования тепловой мощности, возможность получения пламени необходимой длины и светимости, а также применение их для топок, работающих под разрежением и избыточном давлении.

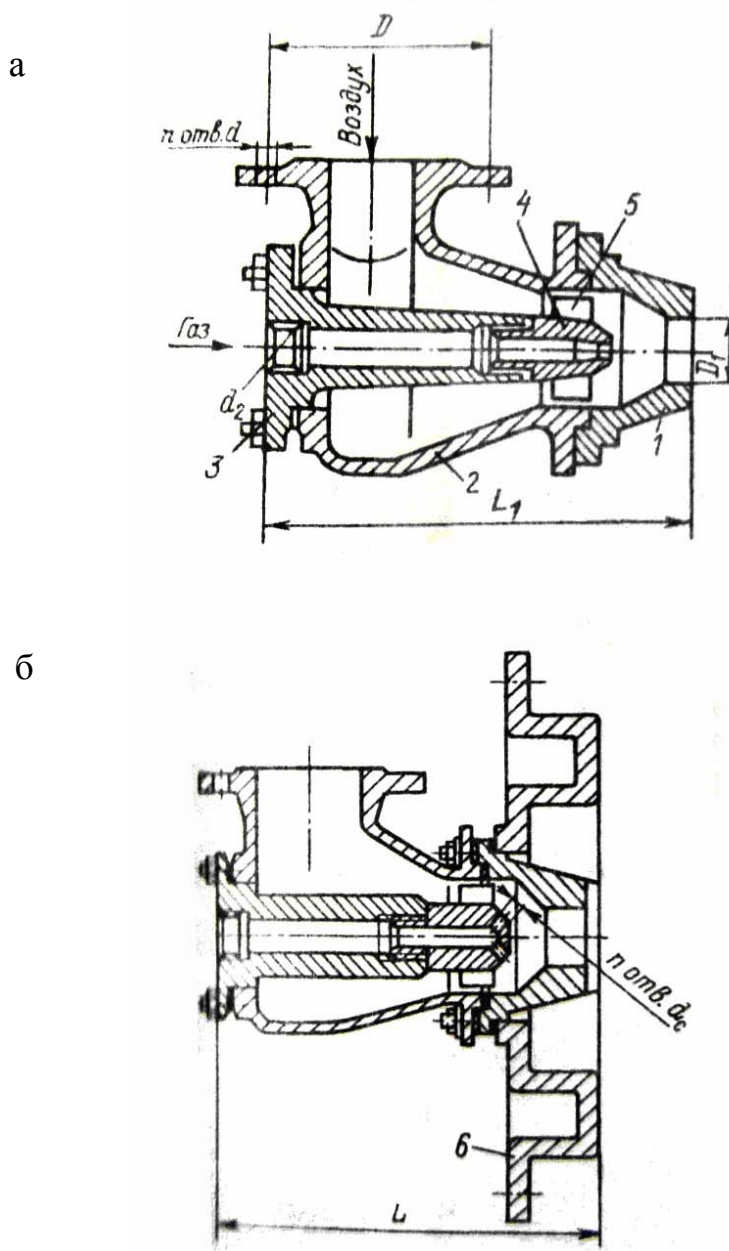


Рис. 3.9. Горелка ГНП конструкции Теплопроекта:  
 а – с односопловым наконечником; б – с многосопловым наконечником;  
 1 – насадок; 2 – корпус; 3 – газораспределительное устройство; 4 – наконечник;  
 5 – завихритель; 6 – фронтальная плита

Газовые горелки вихревые конструкции ГТВ Мосгазниипроекта предназначены для сжигания газа низкого или среднего давления в топках котлов, печей и сушил, работающих под разрежением или избыточном давлении.

Конструкция горелок (рис. 3.10) обеспечивает центральную струйную раздачу газа в закрученный поток воздуха. Центральная труба служит для розжига горелки переносным запальником и одновременно для наблюдения за горением газа.

Полное сгорание природного газа обеспечивается при номинальной тепловой мощности с  $\alpha_1 = 1,02 \dots 1,05$ . В качестве стабилизатора пламени для этих горелок применяется керамический туннель с внезапным расширением.

Горелка блочная ГБ-0,85, изготавливаемая Борисоглебским котельно-механическим заводом (г. Борисоглебск Воронежской области), предназначена для сжигания природного газа низкого давления в топках автоматизированных котлов и теплогенераторов сельскохозяйственного назначения.

Горелка блочная (рис. 3.11) состоит из вентилятора радиального 1, горелки газовой 2, блока газового 3, комплекта средств управления (КСУБ) 4. Вентилятор подает в газовую горелку воздух с необходимым давлением и расходом; природный газ через блок газовый поступает в горелку, где происходит смешивание с воздухом. Зажигание газовой смеси производится электрической искрой от трансформатора зажигания через электрод зажигания. Процесс сжигания природного газа осуществляется факелом в камере горения котла или теплогенератора.

Регулирование тепловой мощности горелки производится путем двухступенчатого изменения расхода газа и подачи воздуха. После запуска горелка работает в режиме «малый огонь». Переключение горелки на режим «большой огонь» осуществляется автоматически регулятором мощности котла или теплогенератора. Для подключения приборов визуального контроля давления газа и воздуха перед горелкой предусмотрены штуцеры 7 и 8.

В блоке газовом последовательно по ходу газа установлены: кран 10 (основной запорный орган), отсечной запорный клапан 11 и регулировочный клапан, настраиваемый на «большой и малый огонь».

КСУБ предназначен для автоматического управления горелкой и защитного выключения (блокировки) горелки в следующих случаях:

- при погасании пламени горелки;
- при прекращении подачи электроэнергии;
- при снижении давления воздуха до 50 – 20 Па;
- при снижении давления газа за основным запорным органом до  $2400 \pm 200$  Па;
- при повышении давления газа за основным запорным органом до  $4400 \pm 500$  Па;
- при недопустимых отклонениях параметров котла или теплогенератора;
- при срабатывании защиты от токов коротких замыканий и перегрузок.

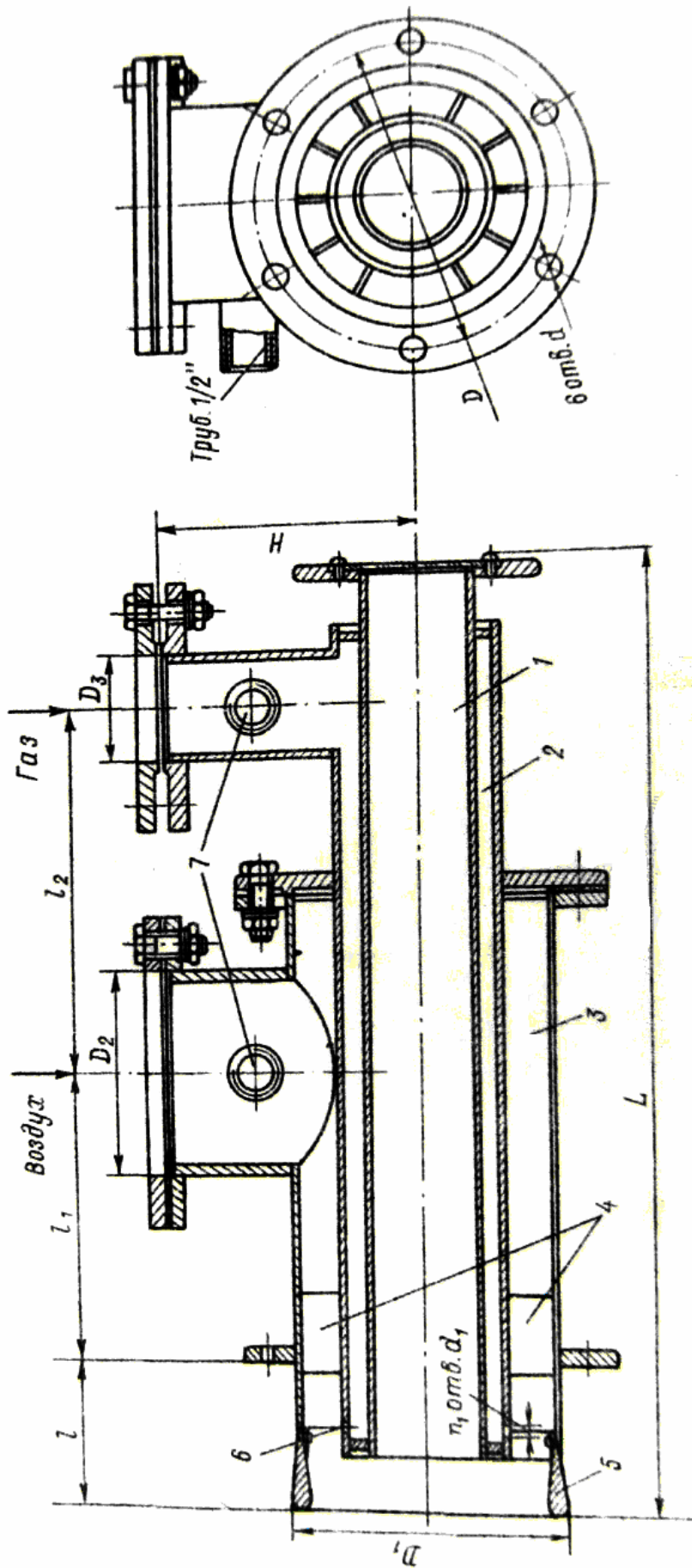


Рис. 3.10. Горелка ГВ конструкции МосгазНИИпроект:  
 1 – труба направляющая для запальника и для наблюдения за горелкой;  
 2 – камера газовая; 3 – камера воздушная; 4 – завихритель; 5 – насадка;  
 6 – отверстие для выхода газа; 7 – штуцера для подключения манометров

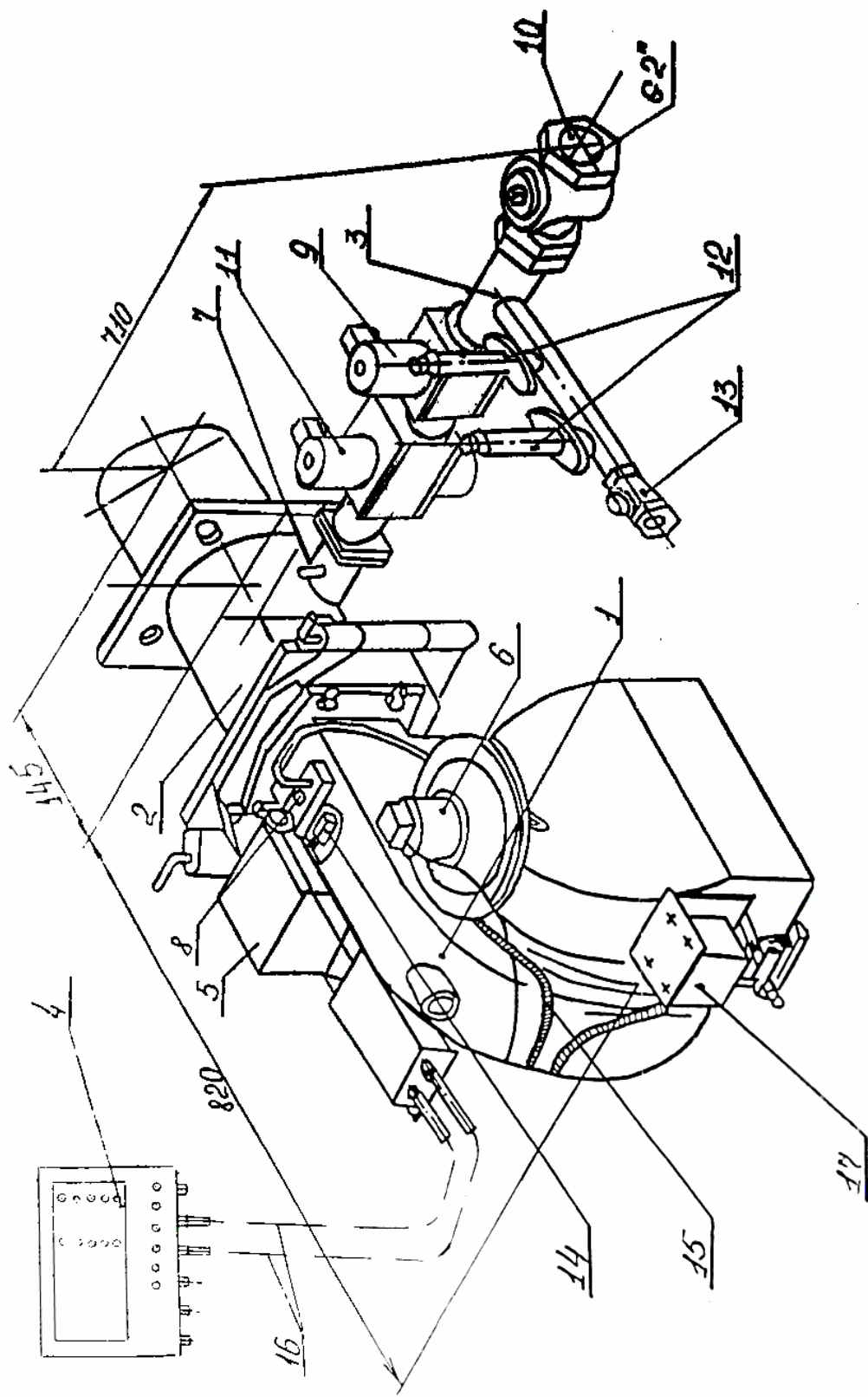


Рис. 3.11. Горелка блочная ГБ-0,85:

1 – вентилятор; 2 – горелка; 3 – блок газовый; 4 – блок газовой; 5 – трансформатор; 6 – датчик-реле давления воздуха; 7, 8 – штуцеры для контроля давления газа и воздуха перед горелкой; 9 – отсечной клапан; 10 – кран (основной запорный орган); 11 – регулировочный клапан; 12 – датчик-реле давления газа; 13 – кран свечи безопасности; 14 – блок фотодагчиков; 15, 16 – кабели соединительные; 17 – электромагнит

Рынок предлагает широкий ряд блочных горелок зарубежных производителей. Например, фирма Venton (Швеция) производит горелки (рис. 3.12) для коммунальных потребителей (водогрейных и паровых котлов малой и средней мощности, термических и кузнечных печей, сушил и др.).

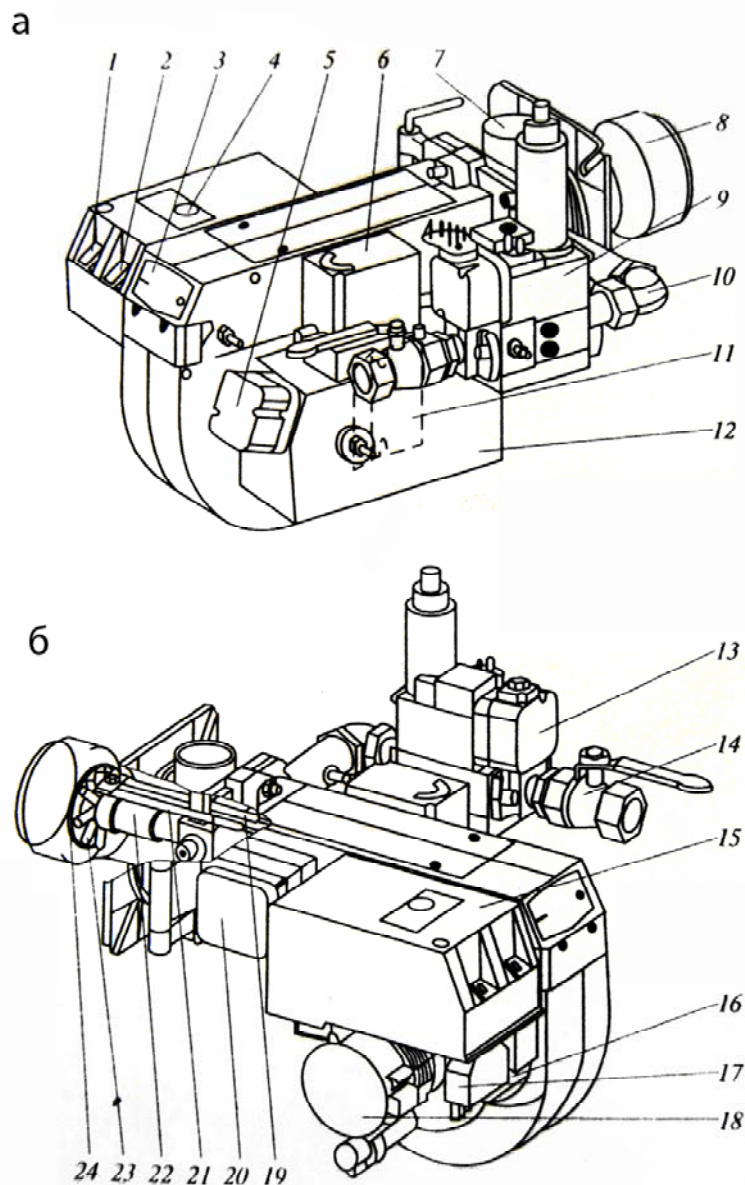


Рис. 3.12. Горелка блочная фирмы Venton (Швеция) мощностью 60–200 кВт для коммунальных потребителей:

- а – вид справа; б – вид слева; 1 – тумблер включения первой ступени; 2 – тумблер включения второй ступени; 3 – смотровое окно; 4 – кнопка сброса блокировки; 5 – выключатель давления воздуха; 6 – демпферный мотор; 7 – настройка головной части горелки; 8 – труба горелки; 9 – мультиблок; 10 – соединительная трубка; 11 – воздушная заслонка; 12 – воздухозаборник; 13 – выключатель давления газа; 14 – шаровой кран; 15 – крыльчатка вентилятора; 16 – блок управления; 17 – разъем; 18 – электродвигатель; 19 – электрод зажигания; 20 – трансформатор зажигания; 21 – ионизационный электрод; 22 – внутренняя сборка; 23 – сопло горелки; 24 – пластина прерывателя

## Контрольные вопросы

1. Дайте определение слова «горелка».
2. Какие горелки считаются автоматическими?
3. Какие горелки относятся к полуавтоматическим?
4. Объясните устройство блочных горелок.
5. Что понимается под термином «основная горелка»?
6. Объясните назначение запальной горелки.
7. Что понимается под термином «камера горения горелки»?
8. Какое состояние горелки считается аварийным?
9. Что понимается под безопасным выключением горелки?
10. Какая мощность горелки считается номинальной, максимальной, минимальной рабочей, минимальной?
11. Дайте определение коэффициента предельного регулирования и коэффициента рабочего регулирования.
12. Что понимается под пределом устойчивой работы горелки?
13. Дайте определение максимального, номинального, минимального рабочего и минимального давления газа перед горелкой.
14. Что понимается под максимальным, номинальным, минимальным рабочим и минимальным расходом газа через горелку?
15. Какой воздух для горения считается первичным, а какой – вторичным?
16. Как классифицируют горелки по способу подачи компонентов?
17. Как классифицируют горелки по степени подготовки смеси?
18. Как классифицируют горелки по номинальному давлению газа перед горелками?
19. Укажите допустимые потери теплоты от химнедожога в диапазоне рабочего регулирования горелки.
20. Каков допустимый уровень шума, создаваемый горелкой?

## 4. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СЖИГАНИЯ ГАЗА

### 4.1. Общие положения

При горении газового топлива его горючие составляющие вступают в химическое взаимодействие с кислородом. В большинстве случаев кислород поступает с воздухом, подаваемым на горение. Азот, содержащийся в воздухе, в горении не участвует и, нагреваясь, уносит значительное количество теплоты.

В воздухе содержится около 21 % об. кислорода и 79 % об. азота и очень небольшое количество других газов. Следовательно, теоретически необходимый для сжигания газа объем воздуха больше требуемого для реакции горения объема кислорода в  $100:21 = 4,76$  раза. При этом на каждую часть кислорода приходится  $79:21 = 3,76$  частей азота.

Однако если в топку подавать только необходимое количество воздуха, то добиться полного сгорания газа невозможно. Объясняется это трудностями процесса смесеобразования газа и воздуха. Поэтому на практике приходится подавать воздуха больше, чем теоретически необходимо, т.е. сжигать газ с избытком воздуха. В специальных устройствах, например в печах безокислительного нагрева металла, газ сжигают с недостатком воздуха.

Величина избытка определяется коэффициентом избытка воздуха  $\alpha$ , который показывает отношение действительного количества воздуха, подаваемого на горение, к теоретически необходимому. Стремление сжигать газ с  $\alpha$ , близким к 1,0, обусловлено целью обеспечить наиболее экономичную и эффективную работу газосжигающей установки. Чем меньше  $\alpha$ , тем меньше потери теплоты с уходящими газами. Кроме того, увеличение  $\alpha$  снижает температуру в топке – газ горит менее активно и сгорание может стать неполным. Однако, добиваясь сжигания газа с наименьшим  $\alpha$ , нельзя его снижать настолько, чтобы сгорание стало неполным и возникали потери теплоты с химическим недожогом.

В некоторых установках в соответствии с техническими требованиями не требуется поддерживать в топках высокую температуру, и сжигание газа с повышенными  $\alpha$  допустимо (например, если требуется создать окислительную среду). Из изложенного следует, что от организации подачи воздуха зависят показатели работы газосжигающих установок.

### 4.2. Контроль за сжиганием газа

Если было бы возможно обеспечить в топке полное сгорание газа при подаче только теоретического количества воздуха, то в сухих продуктах сгорания содержалось бы максимальное количество диоксида углерода

$CO_{2max}$ . Соотношение между  $CO_{2max}$  и количеством в продуктах полного сгорания кислорода и диоксида углерода выражается уравнениями

$$CO_{2max} = \frac{CO_2 \cdot 100}{100 - 4,76O_2}, \% \quad (4.1)$$

$$\frac{CO_2}{CO_{2max}} + \frac{O_2}{21} = 1. \quad (4.2)$$

Если при анализе продуктов полного сгорания газа при помощи газоанализаторов содержание в них  $O_2$  и  $CO_2$  не соответствует значениям, которые удовлетворяют приведенным равенствам, то это означает:

- анализ выполнен неточно, если содержание  $CO_2$  больше расчетного;
- в продуктах сгорания имеются горючие составляющие (химический недожог), если содержание  $CO_2$  меньше расчетного.

Для природных и попутных газов  $CO_{2max}$  равно соответственно 11,8 и 13 % об. Расчетные соотношения между  $CO_2$ ,  $O_2$ ,  $N_2$  и  $\alpha$  для этих газов приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Состав продуктов полного сгорания и коэффициенты  $\alpha$

Природный газ				Попутный (нефтепромысловый) газ			
$CO_2$	$O_2$	$N_2$	$\alpha$	$CO_2$	$O_2$	$N_2$	$\alpha$
1	2	3	4	5	6	7	8
11,8	0,0	88,2	1,00	13,0	0,0	87,0	1,00
11,6	0,4	88,0	1,02	12,8	0,3	86,9	1,01
11,4	0,7	87,9	1,03	12,6	0,6	86,7	1,03
11,2	1,1	87,7	1,05	12,4	1,0	86,6	1,04
11,0	1,4	87,6	1,06	12,2	1,3	86,5	1,05
				12,0	1,6	86,4	1,07
10,8	1,8	87,4	1,08	11,8	1,9	86,3	1,09
10,6	2,1	87,3	1,10	11,6	2,2	86,2	1,11
10,4	2,5	87,1	1,12	11,4	2,6	86,0	1,13
10,2	2,8	87,0	1,14	11,2	2,9	85,9	1,15
10,0	3,2	86,8	1,16	11,0	3,2	85,8	1,16
9,8	3,6	86,6	1,18	10,8	3,5	85,7	1,18
9,6	3,9	86,5	1,20	10,6	3,9	85,5	1,21
9,4	4,2	86,4	1,22	10,4	4,2	85,4	1,23
9,2	4,6	86,2	1,25	10,2	4,5	85,3	1,25
9,0	5,0	86,0	1,28	10,0	4,8	85,2	1,27
8,8	5,3	85,9	1,30	9,8	5,1	85,1	1,30
8,6	5,7	85,7	1,33	9,6	5,5	84,9	1,32
8,4	6,1	85,5	1,36	9,4	5,8	84,8	1,35
8,2	6,4	85,4	1,40	9,2	6,1	84,7	1,37
8,0	6,8	85,2	1,43	9,0	6,4	84,6	1,40



Окончание табл. 4.1

1	2	3	4	5	6	7	8
7,8	7,1	85,1	1,46	8,8	6,8	84,4	1,44
7,6	7,5	84,9	1,50	8,6	7,1	84,3	1,46
7,4	7,8	84,8	1,53	8,4	7,4	84,2	1,50
7,2	8,2	84,6	1,57	8,2	7,7	84,1	1,53
7,0	8,5	84,5	1,61	8,0	8,1	83,9	1,56
6,8	8,9	84,3	1,66	7,8	8,4	83,8	1,61
6,6	9,2	84,2	1,71	7,6	8,7	83,7	1,65
6,4	9,6	84,0	1,76	7,4	9,0	83,6	1,68
6,2	10,0	83,8	1,82	7,2	9,4	83,4	1,74
6,0	10,3	83,7	1,87	7,0	9,7	83,3	1,78
5,8	10,7	83,5	1,94	6,8	10,0	83,2	1,83
5,6	11,0	83,4	2,00	6,6	10,3	83,1	1,88
5,4	11,4	83,2	2,07	6,4	10,7	82,9	1,94
5,2	11,8	83,0	2,15	6,2	11,0	82,8	2,00
5,0	12,1	82,9	2,22	6,0	11,3	82,7	2,06

Коэффициент  $\alpha$  определяют при полном сгорании газа по формуле

$$\alpha = \frac{N_2}{N_2 - 3,76O_2}. \quad (4.3)$$

При неполном сгорании газа  $\alpha$  определяют по формуле

$$\alpha = \frac{N_2}{N_2 - 3,76(O_2 - 0,5CO - 0,5H_2 - 2CH_4)}, \quad (4.4)$$

где  $N_2, O_2, CO, H_2, CH_4$  – содержание компонентов в продуктах сгорания, % об.

Если при работе газосжигающей установки отсутствуют специфические условия, то, как правило, стремятся сжигать газ при минимальном  $\alpha$  и без химического недожога, т.е. при максимальном содержании в продуктах сгорания  $CO_2$ , минимальном содержании  $O_2$  и полном отсутствии  $CO, H_2$  и  $CH_4$ .

Состав продуктов сгорания определяют с помощью автоматических и ручных газоанализаторов. При режимной наладке работы газосжигающего агрегата состав продуктов сгорания определяют переносным хроматографом. Более полный и точный газовый анализ производят в химических лабораториях на стационарных хроматографах.

Для этого пробы газа и продуктов сгорания отбирают в стеклянные бюретки и отправляют в лабораторию. Следует иметь в виду, что выводы о действительном составе продуктов горения могут быть сделаны только в том случае, если имеется уверенность, что отобранная в данной точке проба является усредненной, характеризующей состав дымовых газов по всему сечению газохода. В зависимости от наличия в топке и газоходе местных течений, различием температур и других условий состав продуктов горения в ряде точек топки и газоходов может изменяться. Поэтому при проведении наладочных работ следует установить место, где взятая проба наиболее полно характеризует средний состав продуктов горения в данном сечении.

### 4.3. Тепловой баланс газосжигающих агрегатов

Эффективность использования газа в агрегатах определяется двумя факторами: полнотой процесса горения газа и глубиной охлаждения продуктов сгорания. Основная часть теплоты, вносимой в агрегат, воспринимается рабочим телом в поверхностях нагрева и т.п. (полезно используемая теплота). Распределение вносимой теплоты на полезно используемую и отдельные виды потерь производится путем составления теплового баланса агрегата. Тепловой баланс составляется для установившегося теплового состояния агрегата, как правило, на  $1 \text{ м}^3$  сжигаемого газа:

$$Q_p^p = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_5, \quad (4.5)$$

где  $Q_p^p$  – располагаемая теплота, внесенная в агрегат,  $\text{кДж/м}^3$ ;

$Q_1$  – теплота, полезно использованная,  $\text{кДж/м}^3$ ;

$Q_2$  – потеря теплоты с уходящими (дымовыми) газами,  $\text{кДж/м}^3$ ;

$Q_3$  – потеря теплоты от неполноты сгорания газа,  $\text{кДж/м}^3$ ;

$Q_5$  – потеря теплоты в окружающую среду через наружные поверхности агрегата,  $\text{кДж/м}^3$ .

Располагаемая теплота определяется по формуле

$$Q_p^p = Q_n^c + Q_b + Q_r, \quad (4.6)$$

где  $Q_n^c$  – теплота сгорания газа по нижнему пределу,  $\text{кДж/м}^3$ ;

$Q_b$  – теплота, внесенная с воздухом, подогретым от постороннего источника,  $\text{кДж/м}^3$ ;

$Q_r$  – физическая теплота газа,  $\text{кДж/м}^3$ .

Для большинства случаев при работе агрегатов на «холодном» воздухе принимают  $Q_p^p \approx Q_n^c$ .

Если обе части уравнения (4.5) разделить на  $Q_p^p$ , то получаем уравнение теплового баланса агрегата в относительных величинах

$$100 = q_1 + q_2 + q_3 + q_5, \quad (4.7)$$

где  $q_1, q_2, q_3, q_5$  – соответствующие составляющие теплового баланса, %.

Тепловой баланс составляют по одному из двух методов – прямому и обратному. Метод обратного баланса требует значительно меньшего числа измерений и позволяет более точно установить условия сжигания газа. Для обратного баланса агрегата измеряют только температуру и состав уходящих газов. Тепловой баланс агрегата составляют для нескольких режимов его работы, как правило, для номинального, минимального и одного-двух промежуточных.

Производительность агрегата может быть определена по количеству и параметрам рабочего тела (пара, горячей воды, нагрев заготовок и т.п.). При отсутствии такой возможности – ориентировочно по расходу газа.

Если агрегат не оборудован необходимыми КИП, то при теплотехнических испытаниях применяют переносные КИП.

Пользуясь данными измерений, определяют, какая часть теплоты, содержащейся в газе, затрачена полезно на выработку пара, горячей воды, нагрев заготовок и другие технологические нужды (в зависимости от назначения агрегата). Эта часть теплоты  $q_1$ , выраженная в процентах, называется КПД агрегата. Чем больше КПД, тем экономичнее агрегат работает, тем меньше тепловые потери.

Потери теплоты с уходящими газами  $q_2$  зависят от их температуры и  $\alpha$ . Согласно методике, разработанной М.Б. Равичем,  $q_2$  можно определить по формуле, %,

$$q_2 = 0,01z (t_{yg} - t_b), \quad (4.8)$$

где  $z$  – коэффициент, зависящий от температуры продуктов сгорания и степени их разбавления избыточным воздухом, т.е. от содержания в сухих продуктах полного сгорания  $CO_2$ , а в продуктах неполного сгорания суммы ( $CO_2 + CO + CH_4$ ). Значения величины  $z$  для природного газа приведены в табл. 4.2;

$t_{yg}, t_b$  – соответственно температура уходящих газов и воздуха, °С.

Таблица 4.2

Значения  $z$  для природного газа

Содержание $\text{CO}_2 + \text{CO} + \text{CH}_4$ , %	Температура уходящих газов, °С					
	0–250	250–350	350–500	500–700	700–900	900–1100
1	2	3	4	5	6	7
11,8	4,13	4,16	4,28	4,37	4,47	4,57
11,7	4,15	4,21	4,31	4,40	4,50	4,60
11,6	4,18	4,25	4,33	4,43	4,53	4,63
11,5	4,21	4,28	4,37	4,47	4,57	4,67
11,4	4,24	4,30	4,40	4,50	4,60	4,70
11,3	4,26	4,32	4,43	4,53	4,63	4,73
11,2	4,28	4,34	4,46	4,56	4,66	4,76
11,1	4,30	4,37	4,48	4,58	4,68	4,78
11,0	4,35	4,40	4,50	4,60	4,70	4,80
10,9	4,40	4,43	4,53	4,63	4,73	4,83
10,8	4,43	4,47	4,57	4,67	4,77	4,87
10,7	4,45	4,50	4,60	4,70	4,80	4,90
10,6	4,48	4,53	4,65	4,75	4,85	4,95
10,5	4,50	4,56	4,67	4,78	4,88	4,98
10,4	4,53	4,60	4,70	4,80	4,90	5,00
10,3	4,57	4,63	4,75	4,85	4,95	5,05
10,2	4,60	4,65	4,78	4,88	4,98	5,08
10,1	4,63	4,70	4,80	4,90	5,00	5,10
10,0	4,67	4,75	4,85	4,95	5,05	5,15
9,9	4,70	4,80	4,90	5,00	5,10	5,20
9,8	4,75	4,83	4,93	5,03	5,13	5,23
9,7	4,80	4,87	4,97	5,07	5,17	5,27
9,6	4,84	4,90	5,00	5,10	5,20	5,30
9,5	4,88	4,95	5,05	5,15	5,25	5,35
9,4	4,93	5,00	5,10	5,20	5,30	5,40
9,3	4,97	5,05	5,15	5,25	5,35	5,45
9,2	5,02	5,07	5,20	5,30	5,40	5,50
9,1	5,07	5,10	5,25	5,35	5,50	5,60
9,0	5,10	5,15	5,30	5,40	5,55	5,65
8,9	5,13	5,22	5,33	5,45	5,60	5,70
8,8	5,17	5,26	5,35	5,50	5,65	5,75
8,7	5,22	5,30	5,40	5,55	5,70	5,80
8,6	5,27	5,35	5,45	5,60	5,75	5,85
8,5	5,30	5,40	5,50	5,65	5,80	5,90

Окончание табл. 4.2

1	2	3	4	5	6	7
8,4	5,35	5,45	5,55	5,70	5,85	5,95
8,3	5,40	5,50	5,60	5,75	5,90	6,00
8,2	5,45	5,55	5,65	5,80	5,95	6,05
8,1	5,50	5,60	5,70	5,85	6,00	6,10
8,0	5,57	5,67	5,77	5,90	6,05	6,15
7,9	5,62	5,72	5,85	5,95	6,10	6,20
7,8	5,68	5,80	5,90	6,00	6,15	6,25
7,7	5,75	5,85	5,97	6,08	6,25	6,35
7,6	5,80	5,90	6,05	6,15	6,32	6,42
7,5	5,85	6,00	6,10	6,25	6,40	6,50
7,4	5,90	6,05	6,20	6,30	6,45	6,60
7,3	6,00	6,10	6,25	6,35	6,50	6,65
7,2	6,05	6,15	6,30	6,40	6,55	6,70
7,1	6,10	6,25	6,40	6,50	6,65	6,80
7,0	6,22	6,32	6,45	6,60	6,75	6,90

Например, ориентировочно можно считать, что возрастание  $t_{\text{гр}}$  только на 10 °С выше нормальной для данной нагрузки котла увеличивает  $q_2$  не менее чем на 0,5 %, а увеличение  $\alpha$  на 0,1 увеличивает  $q_2$  приблизительно на 1 %. Для уменьшения  $q_2$  необходимо вести сжигание газа с наименьшим  $\alpha$  в топке, свести до минимума подсосы воздуха в топку и газоходы, не допускать загрязнения поверхностей нагрева котла накипью и сажой. Установка за котлом экономайзеров и воздухоподогревателей уменьшает  $q_2$ .

Потери теплоты от химического недожога  $q_3$  имеют место, когда в продуктах сгорания обнаруживаются горючие составляющие: оксид углерода, водород, метан. Согласно данным анализа продуктов сгорания природного газа  $q_3$  можно определить по формуле, %,

$$q_3 = \frac{35\text{CO} + 30\text{H}_2 + 100\text{CH}_4}{\text{CO}_2 + \text{CO} + \text{CH}_4}. \quad (4.9)$$

Газ значительно легче, чем другие виды топлива, перемешивается с воздухом. Поэтому при хорошей конструкции горелок и топок, нормальной организации сжигания газа его можно сжигать без потерь от химического недожога  $q_3$ .

Потери теплоты в окружающую среду  $q_5$  включают теплоту, отдаваемую обмуровкой и другими частями агрегата окружающему воздуху. Значение  $q_5$  зависит от качества обмуровки и изоляции наружных стенок агрегата и от разности температур наружных поверхностей и окружающей

среды. Согласно нормативных требований  $q_5$  следует определять по графикам (например, для паровых котлов приведен на рис. 4.1). Однако для ряда газосжигающих агрегатов такие графики отсутствуют, в связи с чем  $q_5$  определяют методом обратного баланса.

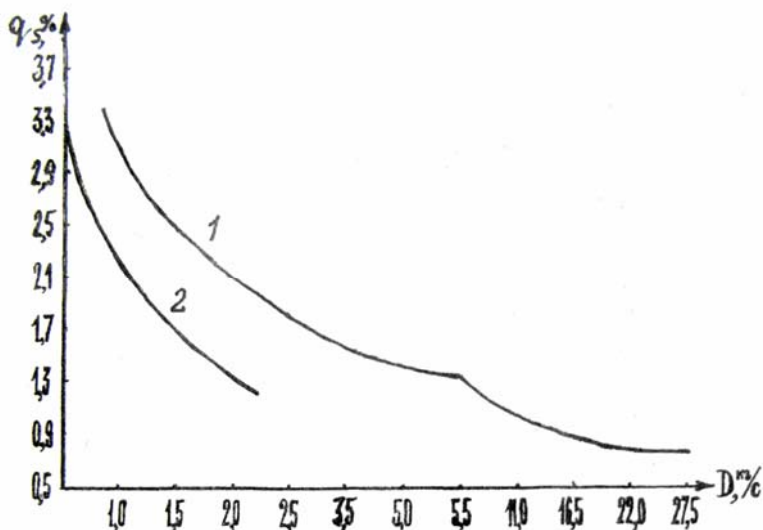


Рис. 4.1. Потери теплоты  $q_5$ :  
1 – котел с хвостовыми поверхностями нагрева; 2 – собственно котел

Целесообразно для сравнения работы газосжигающих агрегатов принимать за основу коэффициент использования топлива (КИТ):

$$\text{КИТ} = 100 - (q_2 + q_3), \% \quad (4.10)$$

В сравнении с твердым топливом при сжигании газа меньше  $q_2$  и  $q_3$ , отсутствуют потери теплоты с механическим недожогом  $q_4$ . Поэтому при переводе тепловых агрегатов с твердого на газообразное топливо их КПД повышается, что должно учитываться при расчетах топливопотребления.

### Контрольные вопросы

1. Объясните, каким должен быть состав воздуха, принимаемый для технических расчетов горения.
2. При помощи каких приборов определяется состав продуктов сгорания и с какой целью?
3. Наличие каких компонентов в продуктах сгорания указывает на химнедожог?
4. В чем заключается тепловой баланс газосжигающего агрегата?
5. В чем суть прямого и обратного методов составления теплового баланса?
6. Какие факторы определяют КПД газосжигающего агрегата?
7. Как определяется коэффициент использования топлива?

## 5. ПРАКТИКА СЖИГАНИЯ ГАЗА

### 5.1. Общие положения

Газовое топливо, по сравнению с твердым и жидким топливом, имеет следующие преимущества:

- обладает потенциально высокой экономичностью использования (его можно полностью сжечь с минимальным избытком воздуха при отсутствии химического недожога);
- является более экологически чистым (в продуктах сгорания образуется минимальное количество вредных веществ);
- обладает высокой мобильностью (позволяет быстро изменять тепловую мощность газосжигающей установки);
- обеспечивает повышение культуры производства, санитарно-гигиенического уровня установок и помещений и т.д.

Наряду с указанными преимуществами газовое топливо имеет существенный недостаток – способность образовывать взрывоопасные газоздушные смеси, которые в замкнутых объемах (топки, дымоходы) при зажигании (внесении пламени, искры, раскаленные поверхности) приводят к взрыву. С учетом особенностей газового топлива можно сформулировать следующие требования и рекомендации к газосжигающим установкам:

- хорошее техническое состояние и соответствие действующим нормам и правилам;
- оснащенность надежной и безопасной системой обвязочных газопроводов;
- полное и экономичное сжигание газового топлива с минимальным количеством вредных веществ в продуктах сгорания;
- конструкции топок и газогорелочных устройств должны иметь возможность перехода на резервный вид топлива и обратно;
- учет возможностей повышения производительности тепловых установок, использование резервов сжигания газа с большой тепловой мощностью топочного объема;
- оснащенность автоматикой безопасности и регулирования, а также необходимыми контрольно-измерительными приборами;
- топки и дымоходы должны иметь предохранительные взрывные клапаны;
- наличие необходимой технической документации (исполнительные схемы газопроводов, инструкции по пуску, работе и остановке, режимные карты и др.);
- проектирование, пусконаладочные работы и эксплуатацию газосжигающих установок могут осуществлять только специально обученные работники, имеющие соответствующие удостоверения.

Владельцы газифицированных зданий (помещений), организации и предприятия, эксплуатирующие сети газопотребления, должны обеспечивать их содержание в исправном и работоспособном состоянии путем проведения комплекса работ, предусмотренных требованиями ГОСТ Р 54961, ГОСТ Р 54983.

Работы по содержанию в исправном и работоспособном состоянии сетей газопотребления в жилых и многоквартирных домах, общественных и административных зданиях должны производиться (на договорной основе) газораспределительными или другими эксплуатационными организациями, имеющими собственные аварийно-диспетчерские службы или заключившими договор об оказании услуг аварийно-диспетчерского обслуживания потребителей.

Газифицированные предприятия и котельные должны иметь собственные газовые службы или договоры с эксплуатационными организациями, оказывающими на законном основании услуги по техническому обслуживанию и ремонту сетей газопотребления на опасных производственных объектах.

В договорах оказания услуг по техническому обслуживанию и ремонту сетей газопотребления должны быть определены объемы работ, выполняемых эксплуатационными организациями, установлены границы эксплуатационной ответственности и обязательства эксплуатационных организаций и владельцев газифицированных зданий (помещений) по обеспечению условий безопасной эксплуатации сетей газопотребления. Разграничение эксплуатационной ответственности сторон должно оформляться актами установленной формы.

Технические устройства, оборудование и материалы, используемые в процессе эксплуатации сетей газопотребления, должны соответствовать установленным нормативным требованиям к их транспортированию, хранению и области применения. Номенклатура изделий, требующих получения специального разрешения по применению на опасных производственных объектах газифицированных предприятий и котельных устанавливается уполномоченным федеральным органом исполнительной власти в области промышленной безопасности.

Сварочные работы должны выполняться с применением сварочных материалов, оборудования и технологий, аттестованных в аттестационных центрах – специализированных организациях, аккредитованных в установленном порядке Национальным аттестационным комитетом по сварочному производству (НАКС).

Приборы и средства измерения, применяемые в процессе эксплуатации сетей газопотребления, должны содержаться в исправном и работоспособном состоянии в соответствии с требованиями документации изготовителей, проходить своевременную поверку в порядке, установленном



законодательством Российской Федерации в области обеспечения единства средств измерений.

Эксплуатация устройств электрооборудования (в том числе во взрывозащищенном исполнении) должна осуществляться в соответствии с документацией изготовителей и правилами технической эксплуатации электроустановок.

Режимы работы газоиспользующего оборудования на предприятиях и в котельных должны соответствовать режимным картам, утвержденным техническим руководителем предприятия (пример режимной карты приведен в прил.3).

Система технологических защит газоиспользующего оборудования должна обеспечивать прекращение подачи газа в случае отсутствия факела на защитно-запальном устройстве, погасания факела горелки, отклонения давления газа перед горелкой за пределы ее устойчивой работы, уменьшения разрежения в топке (кроме топок, работающих под наддувом), понижения давления воздуха ниже допустимого (для двухпроводных горелок), прекращения подачи электроэнергии или отсутствия напряжения на устройствах управления технологическим процессом и средствах измерения.

Наблюдение за работой газоиспользующего оборудования должно осуществляться обслуживающим персоналом предприятия. При установке систем контроля загазованности газифицированных помещений и обеспечении вывода сигналов о нарушениях работы газоиспользующего оборудования и возникновении опасной концентрации газа или оксида углерода на диспетчерский пункт (в помещение с постоянным присутствием персонала) эксплуатация газоиспользующего оборудования может осуществляться без постоянного наблюдения персонала.

Аварийно-диспетчерское обслуживание сетей газопотребления должно производиться круглосуточно (включая выходные и праздничные дни). По каждому факту аварии, произошедшей в процессе эксплуатации сетей газопотребления, владельцем газифицированного здания (помещения) должно проводиться техническое расследование причин ее возникновения. Порядок расследования и учета аварий устанавливается уполномоченным федеральным органом исполнительной власти. По результатам технического расследования аварий, владельцы газифицированных зданий (помещений), организации и предприятия, эксплуатирующие сети газопотребления, должны разрабатывать организационно-технические мероприятия и принимать своевременные меры по предупреждению повторения подобных происшествий.

Расследование несчастных случаев на производстве при эксплуатации сетей газопотребления должно проводиться в соответствии с трудовым законодательством Российской Федерации.

## 5.2. Ввод сетей газопотребления в эксплуатацию

Подключение объекта газификации к сети газораспределения должно производиться при условии заключения заказчиком договора о подключении объекта с газораспределительной организацией (ГРО). При заключении договора о подключении объекта должен быть проверен срок действия технических условий подключения.

Для заключения договора о подключении к сети газораспределения газифицируемого жилого дома (вновь построенного или существующего) получения технических условий подключения не требуется.

В договорах о подключении должны определяться:

- порядок выдачи ГРО технических условий присоединения и проверки их выполнения;
- порядок ввода в эксплуатацию сетей газопотребления.

Технические условия присоединения предоставляются заказчику для организации разработки проектной документации и выполнения строительно-монтажных работ на участке строительства объекта газификации.

В технических условиях присоединения должны содержаться следующие технические требования:

- диаметр действующего газопровода сети газораспределения и координаты точки подключения к нему газопровода объекта газификации;
- характеристика действующего газопровода сети газораспределения (материал трубы, тип изоляции стальной трубы в точке подключения);
- коррозионная агрессивность грунта, наличие блуждающих токов в точке подключения (при подключении стальных подземных газопроводов), тип и место размещения средств ЭХЗ на действующем газопроводе сети газораспределения;
- давление газа в действующем газопроводе сети газораспределения в точке подключения;
- максимальный часовой и годовой расходы газа, подаваемого потребителю.

При подключении объекта газификации к газопроводу основного абонента координаты точки подключения должны быть согласованы с основным абонентом.

Техническими условиями присоединения должно предусматриваться получение заказчиком технических условий газоснабжающей организации на установку приборов и узлов учета природного газа, а также участие представителей ГРО:

- в приемочном контроле качества изоляционных работ и проведении испытаний на герметичность присоединяемых к сети газораспределения газопроводов (в процессе их строительства);

- во вводе в эксплуатацию средств противокоррозионной защиты, присоединяемых к сети газораспределения подземных газопроводов;
- в приемке сетей газопотребления.

Проектная документация на строительство объекта газификации должна быть согласована с ГРО и газоснабжающей организацией в части ее соответствия выданным техническим условиям.

Работы по вводу сетей газопотребления в эксплуатацию должны выполняться в присутствии уполномоченного представителя заказчика строительства объекта газификации (заказчика проектной документации на газификацию здания). Ввод в эксплуатацию внутридомового газового оборудования многоквартирного дома должен производиться при условии обеспечения представителем заказчика строительства дома (заказчика проектной документации на газификацию существующего дома) свободного доступа в каждую квартиру.

Ввод в эксплуатацию сетей газопотребления должен производиться на основании разрешений выданных ГРО.

Разрешение на первичный пуск газа для ввода в эксплуатацию сетей газопотребления должно выдаваться на основании письменного заявления заказчика строительства (заказчика проектной документации на газификацию существующего здания).

Первичный пуск газа в газопроводы сетей газопотребления должен производиться после выполнения следующих работ:

- проведения контрольной опрессовки газопроводов зданий с подключенным газоиспользующим оборудованием воздухом с избыточным давлением, равным 5 кПа, в течение 5 минут (падение давления воздуха во время проведения опрессовки не должно превышать 200 Па);
- технологического присоединения газопроводов зданий к газопроводу-вводу;
- проведения продувки газом для вытеснения воздуха.

Давление газа при продувке газопроводов должно быть в пределах рабочего давления, установленного проектной документацией. Выпуск газовой смеси должен производиться за пределы помещений здания.

Окончание продувки газопроводов газом должно определяться путем проведения анализа состава или сжиганием отобранных проб газовой смеси. Методы отбора, анализа и сжигания проб газовой смеси должны устанавливаться производственными инструкциями.

По окончании продувки газопроводов газом объемная доля кислорода в пробах газовой смеси не должна превышать 1 %, а сгорание газовой смеси при сжигании проб должно происходить спокойно, без хлопков.

По окончании продувки газопроводов газом должны быть выполнены следующие работы:

- проверка герметичности разъемных соединений газопроводов и газоиспользующего оборудования прибором или пенообразующим раствором;
- проверка параметров давления газа, подаваемого к газоиспользующему оборудованию (по манометру);
- проверка наличия тяги в дымоходах и вентиляционных каналах;
- розжиг горелок и регулировка процесса сжигания газа;
- проверка работы автоматики безопасности газоиспользующего оборудования.

Ввод в эксплуатацию сетей газопотребления при отсутствии тяги в дымоходах и вентиляционных каналах не допускается.

Газоиспользующее оборудование с неисправной автоматикой безопасности должно быть отключено с установкой заглушки на газопроводе и оформлением соответствующей записи в акте ввода сетей газопотребления в эксплуатацию.

Окончание работ по вводу в эксплуатацию сети газопотребления должно быть оформлено актом установленной формы.

Ввод в эксплуатацию сетей газопотребления на предприятиях и котельных включает:

- ввод в эксплуатацию внутримплощадочных газопроводов и газопроводов-вводов при их технологическом присоединении к действующим газопроводам и первичном пуске газа в соответствии с ГОСТ Р 54983;
- работы по вводу в эксплуатацию пунктов редуцирования газа и внутренних газопроводов газифицированных зданий газовой службой предприятия или, на основании соответствующего договора, эксплуатационной организацией;
- ввод в эксплуатацию газоиспользующего оборудования после проведения специализированной организацией пусконаладочных работ и его комплексного опробования.

Первичный пуск газа во внутренние газопроводы зданий для проведения пусконаладочных работ и комплексного опробования газоиспользующего оборудования должен производиться на основании разрешения, выданного уполномоченным территориальным органом исполнительной власти в области промышленной безопасности на основании письменного заявления заказчика строительства объекта газификации. В разрешении на пуск газа должен быть указан срок его действия.

Первичный пуск газа должен производиться после выполнения контрольной опрессовки давлением, равным 0,01 МПа, в течение 1 часа и продувки газом. Падение давления воздуха за время опрессовки не должно превышать 0,6 кПа. Перед пуском газа в котельную должно быть проверено состояние топки, газоходов (проведением вентиляции), дымососов

и вентиляторов, запорных и регулирующих устройств, средств измерений, горелочных устройств, уровня заполнения котла водой.

Давление газа при продувке должно быть в пределах его рабочего давления, установленного проектной документацией. Выпуск газозвдушной смеси должен производиться за пределы помещений здания. Окончание продувки газопроводов газом должно определяться путем проведения анализа состава или сжиганием отобранных проб газозвдушной смеси. Методы отбора, анализа и сжигания проб газозвдушной смеси должны устанавливаться производственными инструкциями. По окончании продувки газопроводов газом объемная доля кислорода в пробах газозвдушной смеси не должна превышать 1 %, а сгорание газозвдушной смеси при сжигании проб должно происходить спокойно, без хлопков.

Перед включением горелок газоиспользующего оборудования должны быть выполнены следующие работы:

- проверка отсутствия утечек газа из разъемных соединений технических устройств, установленных на газопроводе, прибором или пенообразующим раствором;
- проверка по манометрам давления газа и воздуха (при использовании горелок с принудительной подачей воздуха на горение) перед горелочным устройством;
- регулировка разрежения в топке;
- вентиляция топки и газоходов (непосредственно перед розжигом горелки).

Включение горелок газоиспользующего оборудования должно производиться в соответствии с документацией изготовителей.

Комплексное опробование газоиспользующего оборудования в установленном проектной документацией режиме работы должно осуществляться в течение не менее 72 часов после проведения специализированными организациями пусконаладочных работ, его индивидуальных испытаний и разработки режимных карт. Результаты проведения комплексного опробования газоиспользующего оборудования должны оформляться актом установленной формы, заверенным подписями представителей специализированной организации и технического руководителя предприятия.

Приемка газоиспользующего оборудования по результатам комплексного опробования должна производиться комиссией в составе представителей:

- предприятия (котельной);
- строительно-монтажной организации;
- проектной организации (при необходимости);
- ГРО;
- уполномоченного территориального органа исполнительной власти в области промышленной безопасности.

Приемочной комиссии должна предъявляться следующая документация:

- исполнительная документация объекта газификации;
- технологическая схема газопроводов и газоиспользующего оборудования;
- технический отчет специализированной организации о проведении пусконаладочных работ с прилагаемыми к нему протоколами индивидуальных испытаний газоиспользующего оборудования по результатам наладки средств автоматики технологических защит и регулирования процессов сжигания газа;
- режимные карты, утвержденные техническим руководителем предприятия;
- акт результатов проведения комплексного опробования газоиспользующего оборудования.

Результаты работы приемочной комиссии должны оформляться актом ввода внутренних газопроводов и газоиспользующего оборудования в эксплуатацию. Режимные карты и технологические схемы должны быть вывешены в помещении с установленным газоиспользующим оборудованием и доведены до сведения обслуживающего персонала.

Акт ввода газопроводов и газоиспользующего оборудования в эксплуатацию является основанием для предоставления ГРО разрешения на пуск газа для ввода сетей газопотребления в промышленную эксплуатацию.

Документация (акты, протоколы, отчеты), оформленная при приемке и вводе в эксплуатацию сетей газопотребления, подлежит постоянному хранению в составе исполнительной документации объекта газификации.

### 5.3. Эксплуатация газоиспользующего оборудования

Техническое обслуживание газоиспользующего оборудования в жилых и многоквартирных домах, общественных и административных зданиях должно производиться с периодичностью, установленной изготовителями, но не реже, чем в сроки, установленные ГОСТ Р 54961. При техническом обслуживании должны выполняться следующие виды работ:

- проверка соответствия установки газоиспользующего оборудования проектной документации;
- проверка наличия тяги в дымоходе и вентиляционном канале;
- проверка герметичности дымоотвода, соединяющего газоиспользующее оборудование с дымоходом;
- выявление утечек газа из газоиспользующего оборудования;
- разборка и смазка кранов, не обеспечивающих герметичность и плавность хода;

- проверка работоспособности автоматики безопасности;
- проверка организации притока воздуха для сжигания газа;
- проверка параметров давления газа и регулировка процесса сжигания газа на всех режимах работы газоиспользующего оборудования;
- устранение выявленных утечек газа и неисправностей.

По окончании работ по техническому обслуживанию должен проводиться инструктаж потребителей по правилам безопасного пользования газом в быту.

Газоиспользующее оборудование должно быть отключено с установкой заглушки на подводящем газопроводе и составлением акта отключения по установленной форме при выявлении в результате технического обслуживания:

- самовольной газификации или переустройства сетей газопотребления;
- необходимости замены газоиспользующего оборудования (при наличии неустранимых в процессе ремонта неисправностей и утечек газа);
- утечек газа, неисправностей автоматики безопасности и других неисправностей, которые могут повлечь за собой аварию, при отсутствии технической возможности их незамедлительного устранения;
- отсутствия или нарушения тяги в дымоходах;
- нарушения герметичности дымоотвода газоиспользующего оборудования;
- отсутствие условий обеспечения притока воздуха для сжигания газа.

Подключение газоиспользующего оборудования к сети газопотребления должно производиться эксплуатационной организацией после устранения выявленных нарушений и неисправностей.

Ремонт или замена газоиспользующего оборудования должны производиться на основании письменных заявок потребителей, оформленных в результате проведения технического обслуживания или при выявлении дефектов и неисправностей потребителями газа самостоятельно. Эксплуатационная организация должна начать работу по ремонтной заявке не позднее чем через три рабочих дня после ее регистрации. Неисправности газоиспользующего оборудования, которые могут привести к аварии или создадут угрозу безопасности людям, должны устраняться в аварийном порядке.

Неисправности, выявленные в гарантийный срок службы газоиспользующего оборудования, должны устраняться специализированными организациями изготовителей (продавцов).

Результаты выполнения работ по техническому обслуживанию и ремонту газоиспользующего оборудования должны оформляться актами установленной формы.

Обслуживание систем контроля загазованности помещений и уровня содержания в воздухе помещений оксида углерода должно проводиться специализированными организациями изготовителей в соответствии с документацией изготовителей.

Обслуживание вентиляционных каналов и дымоходов газифицированных зданий и помещений должно производиться специализированными организациями. Результаты проверки технического состояния вентиляционных каналов и дымоходов должны оформляться актами.

На период проведения ремонтов дымоходов газоиспользующее оборудование подлежит отключению с установкой заглушки на газопроводе и оформлением акта отключения.

Техническое обслуживание внутренних газопроводов и газоиспользующего оборудования на предприятиях и в котельных должно производиться не реже одного раза в месяц, если другие сроки не установлены документацией изготовителей газоиспользующего оборудования. Работы по техническому обслуживанию газоиспользующего оборудования должны производиться без его отключения.

При техническом обслуживании должны выполняться следующие виды работ:

- проверка герметичности разъемных соединений технических устройств, установленных на газопроводе, прибором или пенообразующим раствором;

- проверка внешним осмотром целостности газопроводов, их креплений и опор;

- обслуживание газоиспользующего оборудования в соответствии с требованиями документации изготовителя;

- проверка соответствия режимным картам и (при необходимости) настройка параметров автоматики технологических защит и регулирования процессов сжигания газа (не реже одного раза в 3 мес);

- проверка герметичности соединений импульсных газопроводов прибором или пенообразующим раствором;

- проверка сохранности пломб (при их наличии), состояния и сроков поверки средств измерений;

- смазка подвижных элементов технических устройств (при необходимости);

- проверка внешним осмотром состояния электроосвещения и вентиляции в помещениях с установленным газоиспользующим оборудованием.

Сведения о проведении технического обслуживания, выявленных дефектах и нарушениях должны оформляться записями в эксплуатационном журнале по установленной форме.

При текущем ремонте газопроводов и газоиспользующего оборудования производится устранение дефектов, неисправностей и нарушений,



выявленных в процессе проведения технического обслуживания. Утечка и нарушения работоспособности средств автоматики технологических защит и регулирования процесса сжигания газа должны устраняться сразу после их выявления.

При внеплановом ремонте должны быть устранены причины и последствия инцидентов (отказов) в процессе эксплуатации газоиспользующего оборудования и ГРУ, а также должна быть восстановлена работоспособность сетей газопотребления после ликвидации аварий (аварийно-восстановительные работы).

При текущем ремонте выполняются следующие виды работ:

- замена поврежденных участков труб и дефектных фитингов газопровода;

- замена (при необходимости) запорной арматуры;

- замена прокладок фланцевых соединений (в сроки, установленные изготовителями уплотнительных материалов);

- замена средств автоматики технологических защит и регулирования процесса сжигания газа;

- замена креплений и опор, окраска газопроводов;

- замена изношенных деталей и узлов газоиспользующего оборудования;

- замена средств измерений (неисправных или требующих проведения поверки) на идентичные средства измерений, исправные и прошедшие поверку.

Устранение утечек газа из разъемных соединений технических устройств, установленных на газопроводах, а также проверка и восстановление работоспособности запорной арматуры должны проводиться в соответствии с ГОСТ Р 54983.

К выполнению работ по ремонту газоиспользующего оборудования, восстановлению работоспособности и замене средств автоматики технологических защит и регулирования процесса сжигания газа с их последующей наладкой должны привлекаться специалисты газовой службы предприятия и/или специализированной организации.

При капитальном ремонте производится замена газогорелочных устройств и не подлежащего ремонту газоиспользующего оборудования заводского изготовления. Работы по капитальному ремонту могут выполняться специализированными организациями.

Замена технического устройства или поврежденного участка газопровода должна выполняться после отключения газопровода и продувки его воздухом. Выпуск газозвдушной смеси в помещение не допускается.

При применении газовой резки для демонтажа поврежденного участка газопровода непосредственно перед началом работ должен быть проведен анализ пробы среды в отключенном газопроводе. При содержании газа в

пробе выше 1 % должна производиться вторичная продувка газопровода воздухом.

Пуск газа в газопровод по окончании ремонтных работ должен производиться после проведения испытаний на герметичность воздухом по нормам, установленным СП 62.13330.2011. Герметичность разъемных соединений технических устройств, установленных на газопроводе, должна быть проверена прибором или пенообразующим раствором при рабочем давлении газа.

Остановка газоиспользующего оборудования для ремонта во всех случаях, за исключением аварийного останова, должна производиться после получения письменного разрешения ответственного за безопасную эксплуатацию газоиспользующего оборудования.

Газоиспользующее оборудование при выводе из эксплуатации на срок более трех суток для проведения ремонтных работ или при переводе его в режим резерва должно отключаться с установкой заглушек на газопроводах, кроме случаев перевода в режим резерва котлов, работающих в автоматическом режиме и эксплуатируемых без постоянного присутствия обслуживающего персонала. Заглушки, устанавливаемые на газопроводе, должны соответствовать диаметру газопровода и максимальному давлению газа в газопроводе. На хвостовике заглушки, выступающем за пределы фланцев, должно быть выбито клеймо с указанием диаметра газопровода, на который ее можно устанавливать, и давление газа, на которое она рассчитана.

При выводе газоиспользующего оборудования в резерв или при ремонте должны быть приняты меры по консервации поверхности нагрева в соответствии с документацией изготовителя.

Остановка газоиспользующего оборудования для ремонта должна производиться путем последовательного выполнения следующих работ:

- отключения запальных газопроводов газогорелочных устройств;
- отключения газогорелочных устройств (при отключении газогорелочных устройств, работающих с принудительной подачей воздуха на горение, следует уменьшить, затем прекратить подачу в горелки газа, после чего прекратить подачу воздуха; при отключении инжекционных горелок следует сначала прекратить подачу воздуха, затем подачу газа);
- отключения газопровода после запорной арматуры и освобождения его от газа продувкой воздухом;
- вентиляции топки и газоходов газоиспользующего оборудования.

Отключающие устройства на продувочных трубопроводах и трубопроводах безопасности после отключения газопровода должны оставаться в открытом положении.

Газоходы котлов, печей и другого газоиспользующего оборудования должны быть отключены от общего борона с помощью шиберов или глухих перегородок.

Приводы отключающих устройств должны быть обесточены.

Перед включением газоиспользующего оборудования в работу после ремонта или при выводе его из резерва должны быть проверены техническое состояние дымоходов и сроки поверки средств измерений.

Перед розжигом горелок газоиспользующего оборудования топки и газоходы должны быть провентилированы. Если при розжиге горелки или в процессе регулирования сжигания газа происходит отрыв, проскок или погасание пламени, подача газа на горелку и защитно-запальное устройство должна быть немедленно прекращена. Повторный розжиг горелки должен производиться после устранения причины неполадок, вентиляции топки и газоходов в течение не менее 10 минут и проверки герметичности затвора запорной арматуры перед горелкой.

После розжига горелки должны быть проведены наладочные работы, обеспечивающие эксплуатацию газоиспользующего оборудования в рабочем режиме в соответствии с режимной картой, а также настройка средств автоматики технологических защит и регулирования процесса сжигания газа.

Включение газоиспользующего оборудования в работу после ремонта или при выводе из резерва должно оформляться актом установленной формы.

Сведения о выполненных текущих и внеплановых ремонтах газопроводов и газоиспользующего оборудования должны оформляться записями в эксплуатационных журналах. Информация о проведенных капитальных ремонтах заносится в эксплуатационные паспорта.

Режимная наладка газоиспользующего оборудования должна производиться не реже одного раза в три года с корректировкой (при необходимости) режимных карт. При стабильной работе газоиспользующего оборудования допускается режимную наладку проводить не реже одного раза в четыре года, при этом необходимо организовать и систематически проводить контроль выбросов загрязняющих веществ в атмосферу.

Внеплановая режимная наладка газоиспользующего оборудования должна производиться в следующих случаях:

– после капитального ремонта газоиспользующего оборудования или внесения конструктивных изменений, влияющих на эффективность использования газа;

– при систематических отклонениях контролируемых параметров работы газоиспользующего оборудования от режимных карт.

Обслуживание систем контроля загазованности и уровня содержания оксида углерода в помещениях с установленным газоиспользующим

оборудованием должно проводиться не реже одного раза в год специализированными организациями или сервисными службами изготовителя.

Проверка технического состояния вентиляционных каналов в зданиях (помещениях) с установленным газоиспользующим оборудованием должна производиться не реже двух раз в год. Пылеуборка и дезинфекция вентиляционных каналов должна проводиться не реже одного раза в три года.

Проверка технического состояния промышленных дымоотводящих устройств (газоходов газоиспользующего оборудования, дымоходов и дымовых труб) и их прочистка должны производиться не реже двух раз в год, а также перед включением газоиспользующего оборудования в работу после ремонта или сезонного отключения (независимо от срока проведения предыдущей проверки) и при выявлении нарушения тяги.

#### 5.4. Аварийно-диспетчерское обслуживание

Аварийно-диспетчерское обслуживание внутридомового газового оборудования (ВДГО) в многоквартирных и жилых домах должно осуществляться АДС территориальных ГРО (городских, районных, межрайонных) на основании договоров оказания услуг по техническому обслуживанию и аварийно-диспетчерскому обеспечению ВДГО, заключенных абонентами (физическими и юридическими лицами).

Аварийно-диспетчерское обслуживание сетей газопотребления в общественных и административных зданиях, на предприятиях и в котельных должно осуществляться на основании договоров оказания услуг АДС, заключенных абонентами с ГРО или другими эксплуатационными организациями, имеющими собственные АДС. В договорах должны быть определены:

- порядок взаимодействия сторон при ликвидации и локализации аварий;

- условия выполнения эксплуатационной организацией аварийно-восстановительных работ, связанных с восстановлением подачи газа после ликвидации аварий.

При поступлении в АДС аварийной заявки на место аварии диспетчером должна быть направлена аварийная бригада на специальном автомобиле АДС, оборудованном радиостанцией, сиреной, проблесковым маячком и укомплектованном инструментом, материалами, приборами контроля, оснасткой и приспособлениями. Руководитель аварийной бригады должен иметь исполнительную документацию аварийного объекта и планшет-схему трассы подземного газопровода в районе аварии с привязкой к постоянным ориентирам места расположения колодцев подземных инженерных коммуникаций, а также подвалов зданий на расстоянии до 50 м в обе стороны от газопровода.

При поступлении аварийной заявки о взрыве, пожаре, загазованности помещений аварийная бригада должна приехать к месту произошедшей аварии не позднее, чем через 5 минут после поступления информации.

При поступлении аварийной заявки о наличии запаха газа в помещении диспетчер должен проинструктировать заявителя о необходимых мерах безопасности.

Аварийная бригада АДС должна прибыть на место аварии в возможно короткий срок, но не позднее, чем через 1 час после получения оперативной информации (аварийной заявки). По прибытии аварийной бригады на место аварии руководитель бригады должен сообщить время прибытия диспетчеру АДС.

Действия персонала АДС на месте аварии при аварийно-диспетчерском обслуживании сетей газопотребления в жилых и многоквартирных домах, общественных и административных зданиях должны осуществляться в соответствии с планом локализации и ликвидации аварий, утвержденным техническим руководителем эксплуатационной организации.

План локализации и ликвидации аварий должен разрабатываться для всех возможных аварий в зоне обслуживания АДС и предусматривать:

- последовательность действий персонала;
- мероприятия по спасению людей;
- обеспечение взаимодействия АДС с другими производственными службами эксплуатационной организации.

Действие персонала АДС на месте аварии при аварийно-диспетчерском обслуживании сетей газопотребления на предприятиях или в котельных должны определяться условием договора оказания услуг в соответствии с планом локализации и ликвидации аварий, утвержденным руководителем предприятия (котельной), и согласованным техническим руководителем эксплуатационной организации.

Участие в локализации и ликвидации аварий сторонних организаций и служб различных ведомств должны определяться планом взаимодействия, согласованным с уполномоченным территориальным органом исполнительной власти в области промышленной безопасности и утвержденным в установленном порядке.

Результаты работ по аварийно-диспетчерскому обслуживанию сетей газопотребления должны оформляться актом по установленной форме.

### **Контрольные вопросы**

1. Какие преимущества имеет газовое топливо в сравнении с другими видами топлива?
2. Какой основной недостаток газового топлива?
3. Объясните назначение предохранительных взрывных клапанов на топках и дымоходах.

4. Какие требования предъявляются к контрольно-измерительным приборам газосжигающих агрегатов?
5. Чему должны соответствовать режимы работы газоиспользующего оборудования?
6. В каких случаях система технологических защит газоиспользующего оборудования должна обеспечивать прекращение подачи газа?
7. В каком случае эксплуатация газоиспользующего оборудования может осуществляться без постоянного наблюдения персонала?
8. Объясните порядок первичного запуска газа в газопроводы сетей газопотребления.
9. Как следует определять окончание продувки газопроводов?
10. Что понимается под комплексным опробыванием газоиспользующего оборудования?
11. Объясните порядок приемки газоиспользующего оборудования в эксплуатацию.
12. Какие работы должны выполняться при техническом обслуживании газопроводов и газоиспользующего оборудования?
13. Какие работы должны выполняться при текущем ремонте газопроводов и газоиспользующего оборудования?
14. Кто должен обслуживать системы контроля загазованности помещений с установленным газоиспользующим оборудованием?
15. Объясните порядок проверки технического состояния вентканалов дымоходов и дымовых труб.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. О газоснабжении в Российской Федерации: Федеральный закон от 31.03.99 г. № 69-ФЗ.
2. ГОСТ 5542–87. Газы горючие природные для промышленного и коммунально-бытового назначения. Технические условия.
3. ГОСТ 20448–90. Газы углеводородные сжиженные топливные для коммунально-бытового потребления. Технические условия.
4. Стаскевич, Н.Л. Справочник по газоснабжению и использованию газа [Текст] / Н.Л. Стаскевич, Г.Н. Северинец, Д.Я. Вигдорчик. – Л.: Недра, 1990. – 762 с.
5. Сигал, И.Я. Защита воздушного бассейна при сжигании топлива [Текст] / И.Я. Сигал. – Л.: Недра, 1988. – 312 с.
6. Пелипенко, В.Н. Горелки бытовых газовых плит [Текст] / В.Н. Пелипенко. – Тольятти: ТГУ, 2004. – 138 с.
7. Ионин, А.А. Газоснабжение [Текст] / А.А. Ионин, В.А. Жила, В.В. Артихович, М.Г. Пшоник. – М.: Изд-во АСВ, 2011. – 472 с.
8. Иссерлин, А.С. Основы сжигания газового топлива [Текст]: справочное руководство / А.С. Иссерлин. – Л.: Недра, 1980. – 271 с.
9. ГОСТ 17356–89. Горелки газовые, жидкотопливные и комбинированные. Термины и определения.
10. ГОСТ 21204–97. Горелки газовые промышленные. Общие технические требования.
11. Устройство газогорелочное для отопительных бытовых печей УГОП-П-16 ГОСТ 16569–86. Паспорт УГОП-П-16-III-07-00-00 ПС.
12. Горелка блочная газовая ГБ-0,85. Паспорт и инструкция по эксплуатации ГБ-0,85.00.00.000 ПС.
13. Брюханов, О.Н. Газоснабжение [Текст] / О.Н. Брюханов, В.А. Жила, И.А. Плужников. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 448 с.
14. Чепель, В.М. Сжигание газов в топках котлов и печей и обслуживание газового хозяйства предприятий [Текст] / В.М. Чепель, И.А. Шур – Л.: Недра, 1980. – 591 с.
15. ГОСТ Р 54961–2012. Национальный стандарт Российской Федерации. Системы газораспределительные. Сети газопотребления. Общие требования к эксплуатации. Эксплуатационная документация.
16. Технический регламент «О безопасности сетей газораспределения и газопотребления», утвержден Постановлением Правительства Российской Федерации от 29.10.2010 г. № 870.
17. Порядок содержания и ремонта внутридомового газового оборудования в Российской Федерации, утвержден Приказом Министра регионального развития Российской Федерации от 26.06.2009 г. № 239.
18. СП 62.13330.2011. Газораспределительные системы. Актуализированная редакция СНиП 42-01–2002.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

### Приложение 1

#### Стандартизованные термины и определения в области газовых горелок (ГОСТ 17356)

Термин	Определение
1	2
1. Горелка	Устройство, обеспечивающее устойчивое сгорание топлива и возможность регулирования процесса горения
2. Горелка с ручным управлением	Горелка, в которой розжиг, изменение режима работы, наблюдение за ее работой и выключение выполняет обслуживающий персонал
2а. Розжиг горелки	Процесс зажигания топлива, подаваемого в горелку
2б. Устройство розжига горелки	Устройство зажигания топлива, подаваемого в горелку
3. Полуавтоматическая горелка	Горелка, оборудованная автоматически действующими: устройством ее дистанционного розжига и системой контроля пламени
4. Автоматическая горелка	Горелка, оборудованная системами и устройствами, обеспечивающими ее автоматический пуск (включающий продувку камеры горения газоиспользующей установки), перевод в рабочее состояние, контроль собственных параметров и параметров топливоиспользующей установки, сигнализацию и выключение. Примечание. В рабочем состоянии регулирование тепловой мощности горелки может осуществляться автоматически или вручную
5. Блочная горелка	Автоматическая горелка, скомпонованная с вентилятором воздуха для горения в единый блок. Примечание. У горелок на жидком топливе в этот блок входит топливный насос или топливный насос и подогреватель топлива
5а. Газовая горелка Ндп. <i>Горелка на газообразном топливе</i>	Горелка, предназначенная для сжигания газообразного топлива
5б. Жидкотопливная горелка Ндп. <i>Горелка на жидком топливе</i>	Горелка, предназначенная для сжигания жидкого топлива
6. Комбинированная горелка	Горелка, предназначенная для отдельного или совместного сжигания газообразного и жидкого топлива. Примечание. В общем случае к комбинированным относятся также горелки, обеспечивающие, наряду с совместным сжиганием газообразного и жидкого топлива, сжигание твердого топлива в пылевидном состоянии



Продолжение прил. 1

1	2
7. Горелка с принудительной подачей воздуха для горения	Горелка, в которую воздух для горения подается дутьевым устройством
8. Горелка без предварительного смешения	Горелка, в которой топливо и воздух для горения смешиваются за выходными отверстиями горелки
9. Горелка с полным предварительным смешением	Горелка, в которой топливо смешивается с воздухом для горения перед выходными отверстиями горелки или в которую подводится готовая горючая смесь
10. Горелка с неполным предварительным смешением	Горелка, в которой топливо не полностью смешивается с воздухом для горения перед выходными отверстиями горелки
11. Инжекционная горелка	Горелка, у которой одна из сред, необходимых для горения, инжектируется другой средой
12. Атмосферная горелка	Горелка, использующая воздух для горения из окружающей среды за счет диффузии или инъекции и диффузии
13. Излучающая горелка	Горелка, у которой основную долю излучения составляет излучение насадки, огнеупорных элементов и (или) прилегающих участков кладки
14. Рекуперативная горелка	Горелка, снабженная рекуператором, в котором осуществляется подогрев воздуха для горения и (или) газообразного топлива продуктами сгорания
15. Регенеративная горелка	Горелка, снабженная регенератором, в котором осуществляется подогрев воздуха для горения и (или) газообразного топлива продуктами сгорания
16. Скоростная горелка	Горелка, в которой обеспечивается высокоскоростной поток продуктов сгорания
17. Испарительная горелка	Горелка, в которой жидкое топливо до процесса сжигания испаряется без дополнительного источника тепла и в виде пара смешивается с воздухом для горения
18. Горелка с распыливанием	Горелка, в которой жидкое топливо распыливается до процесса его сжигания и в виде мелких капель смешивается с воздухом для горения
19. Основная горелка	Горелка, в которой сгорает все поступающее топливо или его основная часть
20. Запальная горелка	Горелка, предназначенная для розжига основной горелки
21. Стационарная запальная горелка	Запальная горелка, жестко соединенная с основной горелкой
22. Переносная запальная горелка	Запальная горелка, предназначенная для поочередного розжига нескольких основных горелок
23. Пилотная горелка	<p>Стационарная запальная горелка, снабженная устройством розжига и системой контроля пламени, работающая в постоянном режиме</p> <p>Примечание. Пилотная горелка обеспечивает поджигание пламени основной горелки, например, при периодическом включении последней, осуществляемом в процессе ступенчатого регулирования</p>

Продолжение прил. 1

1	2
23а. Топливная линия автоматической горелки	Часть автоматической горелки, которая состоит из топливопровода, устройств регулирования и безопасности, расположенных между входным сечением топливопровода и корпусом горелки. Примечание. Основной запорный топливный орган горелки, являющийся одним из устройств безопасности, может не входить в состав топливной линии, например, когда горелка по условиям ее эксплуатации должна располагаться на значительном расстоянии от основного запорного топливного органа
24. Автоматика горелки	Комплекс элементов, обеспечивающих пуск, регулирование, безопасную работу и выключение горелки, действующих автоматически
24а. Программный блок горелки	Узел автоматике горелки, который реагирует на сигналы устройств регулирования и безопасности, выдает управляющие команды, контролирует последовательность пуска горелки, следит за работой горелки и вызывает ее контролируемое и рабочее выключение. Примечание. Программный блок следует заранее определенному алгоритму и всегда функционирует вместе с устройством контроля пламени горелки
25. Система контроля пламени горелки	Система, включающая в себя устройство контроля пламени и управляемый этим устройством быстродействующий запорный топливный орган горелки
26. Устройство контроля пламени горелки	Устройство, реагирующее на пламя контролируемой им горелки, на выходе которого возникают сигналы, показывающие наличие или отсутствие пламени
26а. Кажущееся пламя горелки	Устройство, предназначенное для розжига запальной или основной горелки
27. Запальное устройство горелки	Устройство, предназначенное для розжига горелки
28. Запорный топливный орган горелки	Орган горелки, предназначенный для перекрытия подачи топлива
29. Основной запорный топливный орган горелки	Запорный топливный орган горелки, устанавливаемый первым по ходу топлива и управляемый вручную
30. Автоматический запорный топливный орган горелки	Запорный топливный орган горелки, управляемый автоматикой
31. Быстродействующий запорный топливный орган горелки	Автоматический запорный топливный орган горелки, закрывающийся за время не более 1 с при прекращении подачи энергии
31а. Автоматический запорно-регулирующий топливный орган горелки	Орган горелки, осуществляющий открытие, перекрытие подачи топлива или изменение его расхода по сигналу, поступающему от системы автоматического регулирования горелки
32. Горелочный камень	Выходная часть горелки, выполненная из огнеупорного материала
33. Подогреватель топлива	Устройство, предназначенное для подогрева жидкого топлива с целью достижения требуемой вязкости

Продолжение прил. 1

1	2
34. Форсунка горелки	Элемент горелки, предназначенный для распыливания жидкого топлива
35. Сопло горелки	Элемент горелки, в котором потенциальная энергия среды преобразуется в кинетическую энергию истекающей струи
36. Пропорционизатор	Автоматически действующее устройство, предназначенное для поддержания заданного соотношения топливо-воздух для горения в условиях изменяющейся тепловой мощности горелки
36а. Сетчатый фильтр горелки	Часть автоматической горелки, предназначенная для улавливания частиц примесей
37. Автоматическое устройство контроля герметичности быстродействующего запорного топливного органа газовой горелки	Часть автоматической горелки, служащая для обнаружения утечек газа при недостаточной герметичности быстродействующего запорного топливного органа горелки, обеспечивающая предотвращение пуска горелки и, в необходимых случаях, формирование сигнала оповещения обслуживающего персонала
38. Автоматический орган утечки газообразного топлива	Орган, предназначенный для соединений топливного тракта газовой горелки с атмосферой в нерабочем состоянии
39. Камера горения горелки	Часть горелки, в которой происходит полностью или частично процесс горения
40. Отключенное состояние горелки	Состояние горелки, при котором основной запорный топливный орган горелки закрыт и вся энергия отключена
41. Пуск горелки	Перевод горелки из отключенного состояния в состояние готовности или в рабочее состояние
41а. Пусковой сигнал горелки	Сигнал, который выводит автоматическую горелку из ее пускового положения и включает заранее определенную программу пуска
41б. Проверка на безопасность перед пуском горелки	Проверка цепей защиты автоматики системы безопасности горелки с целью выявления ее неисправности, в том числе в части кажущегося пламени
41в. Розжиг горелки с проверенной искрой	Розжиг горелки, при котором включается подача топлива, после того как проконтролировано наличие искры
41г. Розжиг горелки проверенной запальной горелкой	Розжиг горелки, при котором включается подача основного топлива, после того, как проконтролировано наличие факела запальной горелки
42. Состояние готовности горелки	Состояние горелки, при котором открыт основной запорный топливный орган горелки, подведена электрическая, пневматическая или гидравлическая энергия и работает пилотная горелка
43. Рабочее состояние горелки	Состояние, при котором все элементы горелки функционируют в соответствии с их назначением
43а. Аварийное состояние горелки (топливоиспользующей установки)	Состояние, при котором отклонение контролируемых параметров выходит за недопустимые пределы вследствие возникающих дефектов элементов или систем либо нарушения функций горелки (топливоиспользующей установки)

Продолжение прил. 1

1	2
44. Рабочее выключение горелки	Безопасное автоматическое выключение горелки при отклонении контролируемых параметров за допустимые пределы, при котором повторный пуск горелки осуществляется автоматически путем выключения и последующего включения энергии или обслуживающим персоналом вручную. Примечание. Этот вид выключения в европейских стандартах получил название энергозависимого выключения
45. Защитное выключение горелки	Безопасное автоматическое выключение горелки при аварийном состоянии горелки (топливоиспользующей установки), при котором повторный пуск горелки осуществляется только обслуживающим персоналом вручную. Примечание. Этот вид выключения в европейских стандартах получил название энергонезависимого выключения
45а. Безопасное выключение горелки	Прекращение подачи энергии к автоматическому запорному топливному органу горелки и выключение запального устройства, осуществляемое при отклонении контролируемого параметра за допустимые пределы или при аварийном состоянии горелки и (или) топливоиспользующей установки. Примечание. Безопасное выключение может также происходить в результате выключения или уменьшения подаваемой энергии
45б. Контролируемое выключение горелки	Прекращение подачи энергии к автоматическому запорному топливному органу горелки, осуществляемое в результате действия устройств управления горелки
46. Продувка камеры горения топливоиспользующей установки	Принудительный ввод воздуха в камеру горения топливоиспользующей установки и газоходы с целью вытеснения оставшейся топливо-воздушной смеси и (или) продуктов сгорания. Примечание. Продувка осуществляется через воздушный тракт горелки при прекращенной подаче топлива
46а. Предварительная продувка камеры горения топливоиспользующей установки	Продувка камеры горения топливоиспользующей установки, которая происходит при установленном расходе воздуха перед включением запального устройства горелки
46б. Последующая продувка камеры горения топливоиспользующей установки	Продувка камеры горения топливоиспользующей установки, которая происходит при установленном расходе воздуха сразу после выключения горелки
46в. Время предварительной продувки камеры горения топливоиспользующей установки	Интервал времени между моментом начала подачи воздуха в камеру горения топливоиспользующей установки и моментом включения запального устройства горелки
46г. Время последующей продувки камеры горения топливоиспользующей установки	Интервал времени между моментом выключения горелки и моментом выключения подачи воздуха в камеру горения топливоиспользующей установки

Продолжение прил. 1

1	2
47. Время розжига горелки	Интервал времени от момента начала подачи топлива в горелку до момента появления сигнала о наличии пламени от устройства контроля пламени горелки
47а. Время перед розжигом горелки	Интервал времени между моментом включения запального устройства горелки и моментом начала подачи топлива
47б. Время после розжига горелки	Интервал времени между моментом появления сигнала о наличии пламени от устройства контроля пламени горелки и моментом выключения запального устройства
47в. Полное время розжига горелки	Интервал времени работы запального устройства горелки. Примечание. Полное время розжига горелки состоит из времени перед розжигом, времени розжига и времени после розжига горелки
48. Время защитного выключения при розжиге горелки	Интервал времени от момента начала подачи топлива в горелку до момента полного прекращения подачи топлива при отсутствии сигнала о наличии пламени от устройства контроля пламени горелки
49. Время защитного выключения при погасании пламени горелки	Интервал времени от момента появления сигнала об отсутствии пламени от устройства контроля пламени горелки до момента закрытия запорных топливных органов горелки и прекращения подачи топлива
50. Время срабатывания устройства контроля пламени горелки	Интервал времени от момента погасания пламени до момента появления на выходе устройства контроля пламени соответствующего сигнала
51. Тепловая мощность горелки	Количество теплоты, образующееся в результате сжигания топлива, подводимого к горелке в единицу времени
51а. Пусковая мощность горелки	Наименьшая тепловая мощность горелки, при которой происходит воспламенение топлива и обеспечивается стабильность пламени
52. Максимальная тепловая мощность горелки	Тепловая мощность горелки, составляющая 0,9 мощности, соответствующей верхнему пределу ее устойчивой работы
53. Номинальная тепловая мощность горелки	Наибольшая тепловая мощность горелки, при которой эксплуатационные показатели соответствуют установленным нормам
54. Минимальная тепловая мощность горелки	Тепловая мощность горелки, составляющая 1,1 мощности, соответствующей нижнему пределу ее устойчивой работы
55. Минимальная рабочая тепловая мощность горелки	Минимальная тепловая мощность горелки, при которой показатели ее работы соответствуют установленным нормам
56. Коэффициент предельного регулирования горелки	Отношение максимальной тепловой мощности горелки к ее минимальной тепловой мощности
57. Коэффициент рабочего регулирования горелки	Отношение номинальной тепловой мощности горелки к ее минимальной рабочей тепловой мощности

Продолжение прил. 1

1	2
58. Диапазон регулирования тепловой мощности горелки	Регламентированный диапазон, в котором может изменяться тепловая мощность горелки во время эксплуатации
59. Предел устойчивой работы горелки	Предел работы горелки, при котором еще не возникают погасание, срыв, отрыв, проскок пламени и недопустимые вибрации. Примечание. Существуют верхний и нижний пределы устойчивой работы горелки
60. Присоединительное давление топлива	Статическое давление топлива в топливопроводе непосредственно перед основным запорным топливным органом горелки
61. Присоединительное давление воздуха для горения	Статическое давление воздуха для горения в воздухопроводе непосредственно перед органом, регулирующим подачу воздуха в горелку
62. Максимальное (номинальное, минимальное рабочее, минимальное) давление воздуха для горения перед горелкой	Максимальное (номинальное, минимальное рабочее, минимальное) статическое давление воздуха для горения, измеренное после последнего по ходу воздуха регулирующего или запорного органа и соответствующее максимальной (номинальной, минимальной рабочей или минимальной) тепловой мощности горелки
63. Максимальное (номинальное, минимальное рабочее, минимальное) давление топлива перед горелкой	Максимальное (номинальное, минимальное рабочее, минимальное) статическое давление топлива, измеренное после последнего по ходу топлива регулирующего или запорного органа и соответствующее максимальной (номинальной, минимальной рабочей или минимальной) тепловой мощности горелки
63а. Максимальный (номинальный, минимальный рабочий, минимальный) объемный (массовый) расход топлива через горелку	Объемный (массовый) расход топлива через горелку, соответствующий максимальной (номинальной, минимальной рабочей, минимальной) тепловой мощности горелки
63б. Объемный расход топлива через горелку	Объем топлива, проходящий в единицу времени через горелку
63в. Массовый расход топлива через горелку	Масса топлива, проходящая в единицу времени через горелку
63г. Давление в камере горения топливоиспользующей установки	Давление, измеренное в установленном сечении камеры горения топливоиспользующей установки, которое выше, равно или ниже атмосферного давления. Примечание. Для горизонтальных камер горения установленным сечением считается сечение камеры горения на срезе горелки; для вертикальных камер горения с горизонтально расположенными горелками давление измеряется в верхней части камеры
64. Первичный воздух для горения	Часть воздуха для горения, подаваемого через горелку с целью предварительного смешения с топливом
65. Вторичный воздух для горения	Часть воздуха для горения, подаваемого через горелку или непосредственно в камеру горения топливоиспользующей установки

## Окончание прил. 1

1	2
66. Третичный воздух	Часть воздуха, подаваемого через горелку или непосредственно в камеру горения топливоиспользующей установки, с целью разбавления продуктов сгорания и понижения их температуры
67. Повторный пуск горелки	Процесс, при котором не позднее чем через 1 с после погасания пламени в рабочем состоянии горелки включается подача топлива и пуск горелки производится при выполнении программы пуска
68. Повторный розжиг горелки	Процесс, при котором не позднее чем через 1 с после погасания пламени в рабочем состоянии горелки включается запальное устройство без перерыва в подаче топлива. Примечание. Если воспламенение не произошло, то горелка выключается по истечении времени защитного выключения подачи топлива при погасании пламени
69. Горелка с многоступенчатым регулированием тепловой мощности	Горелка, при работе которой регулятор расхода топлива может устанавливаться в нескольких положениях между максимальным и минимальным рабочими положениями
70. Горелка с трехступенчатым регулированием тепловой мощности	Горелка, при работе которой регулятор расхода топлива может устанавливаться в положениях «максимальный расход» – «минимальный расход» -«закрыто»
71. Горелка с двухступенчатым регулированием тепловой мощности	Горелка, работающая в положениях «открыто-закрыто»
72. Горелка с плавным регулированием тепловой мощности	Горелка, при работе которой регулятор расхода топлива может устанавливаться в любом положении между максимальным и минимальным рабочими положениями
73. Испытательный стенд горелки	Аттестованное оборудование, предназначенное для проверки горелки на соответствие техническим требованиям к ней
74. Камера горения испытательного стенда горелки	Часть испытательного стенда горелки, в которой происходит горение топлива
75. Длина камеры горения испытательного стенда горелки	Расстояние между выходным сечением горелки или горелочного камня и выходным сечением камеры горения испытательного стенда горелки

## Приложение 2

### Термины и определения общих понятий, связанных с рабочим процессом горелок на газообразном и жидком топливах (ГОСТ 17356)

Термин 1	Определение 2
1. Низшая теплота сгорания топлива	Количество теплоты, выделяющееся при полном сгорании единицы массы (объема) топлива, при условии, что вода, образующаяся при сгорании, будет находиться в парообразном состоянии. Примечание. Низшая объемная теплота сгорания топлива относится к единице объема топлива, а низшая удельная теплота сгорания топлива – к единице массы топлива
2. Высшая теплота сгорания топлива	Количество теплоты, выделяющееся при полном сгорании единицы массы (объема) топлива, при условии, что вода, образующаяся при сгорании, будет находиться в жидком состоянии
3. Относительная плотность газообразного топлива	Отношение плотности газообразного топлива к плотности воздуха
4. Низшее число Воббе газообразного топлива	Отношение объемной низшей теплоты сгорания к корню квадратному из относительной плотности газообразного топлива
5. Стехиометрический объем воздуха для горения	Количество воздуха, необходимое для полного сжигания единицы объема или массы топлива, вычисляемое по химическому составу топлива
6. Фактический объем воздуха для горения	Количество воздуха, действительно израсходованное для сжигания единицы объема или массы топлива
7. Коэффициент избытка воздуха для горения	Отношение фактического объема воздуха для горения к стехиометрическому
8. Минимальный коэффициент избытка воздуха для горения	Наименьшее значение коэффициента избытка воздуха, при котором обеспечивается сжигание топлива с химической неполнотой сгорания, не превышающей норму
9. Температура воспламенения топлива	Минимальная температура, при которой в данных условиях горючая смесь воспламеняется при соблюдении минимального термического градиента по ее объему
10. Пределы воспламенения топлива	Минимальная или максимальная объемная концентрация топлива в неподвижной смеси с воздухом (кислородом), достаточная для воспламенения ее от источника зажигания
11. Корневая зона факела	Совокупность точек факела, наименее удаленных от выходных отверстий горелки
12. Фронт пламени	Слой, в котором в данный момент происходит цепная реакция горения



## Окончание прил. 2

1	2
13. Стабильность пламени	Установившееся состояние, при котором пламя занимает неизменное положение по отношению к выходным отверстиям горелки
14. Проскок пламени	Перемещение корневой зоны факела навстречу вытекающей смеси
15. Отрыв пламени	Перемещение корневой зоны факела от выходных отверстий горелки по направлению течения топлива или горючей смеси
16. Частичный отрыв пламени	Перемещение корневой зоны факела от выходных отверстий горелки по направлению течения топлива или горючей смеси, которое проявляется не по всему сечению
17. Срыв пламени	Перемещение корневой зоны факела от выходных отверстий горелки по направлению течения топлива или горючей смеси, сопровождающееся его погасанием
18. Погасание пламени	Прекращение горения по любым причинам
19. Пульсация пламени	Чередующееся изменение параметров факела и локализации его корневой зоны
20. Термостат	Устройство, управляющее работой горелки в зависимости от температуры контролируемой среды
21. Прессостат	Устройство, управляющее работой горелки в зависимости от давления контролируемой среды
22. Сажевое число	Число по шкале Бахараха, указывающее несгоревший углерод в продуктах сгорания
23. Степень экранирования	Отношение охлаждаемой площади тепловоспринимающей поверхности ко всей площади тепловоспринимающей поверхности камеры горения
24. Степень стеснения факела	Отношение площади выходного сечения горелки к площади поперечного сечения камеры горения
25. Топливоиспользующая установка	<p>Устройство, которое предназначено для использования топлива с целью получения тепловой энергии при его сжигании с помощью горелочного устройства.</p> <p>Примечание. К топливоиспользующим установкам относятся:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– устройства с камерами горения (котлы, печи, сушила, теплогенераторы и т.п.);</li> <li>– устройства без камер горения (устройства для сварки и внепечного нагрева)</li> </ul>

Приложение 3

ООО УПЦ «ПЭН»

«УТВЕРЖДАЮ»  
 Ген.директор ОАО «Маяк»  
 \_\_\_\_\_/Вдонин В.А./  
 \_\_\_\_\_ 2012 г.

**РЕЖИМНАЯ КАРТА**

парового котла зав.№ 2970 уст. № 1, типа ДЕ-25/15-270,  
 оборудованного горелкой типа ГМП-16,  
 в котельной ОАО «Маяк», г. Пенза

№	Наименование параметров работы котлоагрегата	Ед. изм.	Нагрузка, %			
			45,01	58,96	79,00	86,70
1	Паропроизводительность фактическая	т/ч	11,25	14,74	19,93	21,69
2	Паропроизводительность видимая	т/ч	12,00	16,00	21,00	23,00
3	Давление пара в барабане	кгс/см.кв.	10,00	10,00	11,00	11,50
4	Расход газа (с поправкой на Т и Р)	м.куб./ч	853,00	1120,00	1520,00	1660,00
5	Расход пара по прибору	т/ч	12,00	16,00	21,00	23,00
6	Давление газа: в коллекторе	кПа	30,00	28,00	23,00	22,00
7	перед горелками щит	кПа	6,40	11,10	18,70	19,90
8	Давление воздуха перед горелкой щит	кПа	0,80	1,40	2,30	2,50
9	Разрежение: в топке	Па	20,00	20,00	20,00	20,00
10	Температура питат. воды	°С	102,00	102,00	102,00	102,00
11	Температура уход. газов за экономайзером	°С	140,00	157,00	180,00	190,00
12	Состав уход. газов за экономайзер:					
	O <sub>2</sub>	%	4,20	3,60	2,50	2,30
	CO <sub>2</sub>	%	9,44	9,78	10,40	10,51
	CO	ppm	0,00	0,00	0,00	0,00
13	Коэффициент избытка воздуха за экономайзером		1,22	1,18	1,12	1,10
14	Удельный расход условного топлива	кгут/Гкал	154,10	154,47	155,06	155,56
15	КПД котлоагрегата	%	92,67	92,45	92,09	91,79

**Примечания:**

1. Режимная карта составлена при теплотворной способности газа 8000 ккал/нм<sup>3</sup>, температуре воздуха перед горелкой +25 °С и температуре газа на узле учета + 5 °С;
2. Рабочее давление пара в барабане котла 9 ÷ 10,5 кгс/см.кв.

Составил: представитель «Подрядчика» \_\_\_\_\_/Лопухов В.П./

Ознакомлен: представитель «Заказчика» \_\_\_\_\_/Дементьев Е.Е./

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ .....	3
ВВЕДЕНИЕ .....	4
1. ГОРЮЧИЕ ГАЗЫ ДЛЯ КОММУНАЛЬНО-БЫТОВОГО ПОТРЕБЛЕНИЯ .....	5
1.1. Общая характеристика .....	5
1.2. Требования к качеству природных газов .....	5
1.3. Требования к качеству сжиженных газов .....	6
2. ГОРЕНИЕ ГАЗОВ .....	9
2.1. Реакции горения .....	9
2.2. Расчеты горения .....	14
2.3. Температура горения .....	16
2.4. Температура самовоспламенения .....	25
2.5. Пределы воспламеняемости и взрываемости .....	26
2.6. Горение в неподвижной среде .....	30
2.7. Горение в ламинарном потоке .....	35
2.8. Горение в турбулентном потоке .....	37
2.9. Устойчивость горения .....	39
2.10. Принципы сжигания .....	47
2.11. Образование продуктов неполного сгорания и вредных веществ .....	51
3. ГАЗОВЫЕ ГОРЕЛКИ .....	65
3.1. Общие положения .....	65
3.2. Классификация и технические требования .....	71
3.3. Примеры горелок .....	78
4. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СЖИГАНИЯ ГАЗА .....	95
4.1. Общие положения .....	95
4.2. Контроль за сжиганием газа .....	95
4.3. Тепловой баланс газосжигающих агрегатов .....	98
5. ПРАКТИКА СЖИГАНИЯ ГАЗА .....	103
5.1. Общие положения .....	103
5.2. Ввод сетей газопотребления в эксплуатацию .....	106
5.3. Эксплуатация газоиспользующего оборудования .....	110
5.4. Аварийно-диспетчерское обслуживание .....	116
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	119
ПРИЛОЖЕНИЯ .....	120

Учебное издание

Прохоров Сергей Григорьевич  
Кожунов Антон Алексеевич

**СЖИГАНИЕ ГАЗА В КОММУНАЛЬНО-БЫТОВЫХ УСТАНОВКАХ**  
Учебное пособие

Под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. Ю.П. Скачкова

Редактор В.С. Кулакова  
Верстка Т.А. Лильп

---

Подписано в печать 10.01.14. Формат 60×84/16.  
Бумага офисная «Снегурочка». Печать на ризографе.  
Усл.печ.л. 7,67. Уч.-изд.л. 8,25. Тираж 80 экз.  
Заказ № 47.



---

Издательство ПГУАС.  
440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, 28.