

В. П. Михеев, Ю. П. Медников. Сжигание природного газа. Л., «Недра», 1975. 391 с.

В книге описаны важнейшие теплофизические свойства природных газов как промышленного топлива и методы расчета его характеристик, а также теоретические основы сжигания. Рассмотрено влияние различных факторов на процесс горения и методы воздействия на факел. Приведена классификация и описаны конструкции в основном тех газовых горелок, которые прошли государственные испытания и рекомендованы к промышленному внедрению. Изложены теория расчета газовых горелок и их работа в нерасчетных условиях. Даны рекомендации по выбору горелок для различных промышленных установок.

Обобщен опыт сжигания газа в топках котлов, печей и других установок различных отраслей промышленности. Описана работа газовых печей с контролируемой атмосферой. Даны основные рекомендации по выбору газового оборудования, наладке и особенностям эксплуатации установок на газовом топливе. Рассмотрены возможные варианты резервирования газового отопления промышленных установок.

Книга рассчитана на инженерно-технический персонал, обслуживающий и проектирующий промышленные установки на природном газе, а также может быть использована студентами вузов соответствующих специальностей.

Табл. 39, ил. 170, список лит. 141 назв.

М $\frac{30804-383}{043(01)-75}$ 215-75

© Издательство «Недра», 1975

ПРЕДИСЛОВИЕ

В предлагаемой читателю монографии авторы сделали попытку познакомить широкий круг инженерно-технических и научных работников с особенностями сжигания природного газа в промышленных установках различных типов и назначений. Так как вопросы высокоэффективного сжигания газового топлива не могут быть сведены к набору каких-либо готовых рецептов (хотя и правильных для конкретных условий), в книге большое внимание уделено горению газа и принципиальным вопросам техники сжигания.

В книге нашли отражение результаты отечественных и зарубежных работ последних лет, в том числе исследования, проведенные во Всесоюзном научно-исследовательском институте по использованию газа в народном хозяйстве (ВНИИПромгаз), Институте газа (ИГ) АН УССР, Всесоюзном научно-исследовательском институте металлургической теплотехники (ВНИИМТ), Куйбышевском политехническом институте (КПТИ), в проектных институтах (Мосгазпроект, Стальпроект, Теплопроект и др.).

Объем книги не позволил осветить ряд важнейших вопросов, тесно связанных с использованием природного газа в качестве промышленного топлива, в частности автоматизацию работы газопотребляющих установок и автоматику безопасности. Не включены в книгу материалы по комплексному использованию газа промышленными предприятиями и ступенчатому использованию тепла сжигаемого газа. Эти вопросы представляют объемную самостоятельную тему и им посвящена специальная литература.

В последнее время, как никогда, приобрела значение проблема охраны от загрязнений окружающей среды. Хотя авторы и не смогли отвести ей место в предлагаемой монографии, но следует заметить, что сжигание газа с достижимыми теплотехническими показателями, т. е. максимальной полнотой сгорания при минимальных коэффициентах избытка воздуха, в промышленных установках отвечает условиям наименьшего загрязнения окружающей среды нежелательными продуктами.

Для понимания материала книги необходимо знание основ гидроаэродинамики, термодинамики и тепломассообмена.

Книга написана с использованием системы единиц по ГОСТ 8550—57. Соотношения между ними (до четырех значащих цифр) и единицами СИ, необходимые для теплотехнических расчетов, приведены ниже.

1 кгс/см² * = 9,807 · 10⁴ па = 9,807 · 10⁴ н/м²
 760 мм рт. ст. * = 10,13 · 10⁴ па
 1 мм рт. ст. = 133,3 па
 1 кгс = 9,807 н
 1 т = 9,807 кн
 1 ккал = 4,187 кдж
 1 ккал/ч = 1,163 вт
 1 ккал/(кг · °С) = 4,187 кдж/(кг · °К)
 1 ккал/(м² · ч · °С) = 1,163 вт/(м² · °К)
 1 кгс · м = 9,807 дж
 1 ккал/сек = 4187 вт = 4,187 кВт

Гл. I, II, IV, V, VI и XI написаны В. П. Михеевым, гл. III, VII, VIII, IX и X — Ю. П. Медниковым.

Авторы считают своим долгом выразить благодарность проф. Н. Л. Стаскевичу за ряд ценных замечаний, сделанных при рецензировании рукописи.

Предлагаемая книга охватывает широкий круг вопросов как теории, связанной с использованием газового топлива, так и приемов его сжигания в различных отраслях промышленности. Поэтому нет сомнений, что может возникнуть ряд замечаний и пожеланий, за которые авторы будут благодарны читателям, их приславшим. Отзывы направлять по адресу: 193171, Ленинград, С-171, Фарфоровская ул., 12, Ленинградское отделение издательства «Недра».

* Применяемые ранее единицы давления «техническая атмосфера» (1 ат), равная 1 кгс/см², и «физическая атмосфера» (1 атм), равная 760 мм рт. ст., теперь для применения недопустимы.

ГЛАВА I.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ГАЗОВОМ ТОПЛИВЕ

§ 1-1.

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ И ГОРЮЧИЕ СВОЙСТВА ГАЗОВ

Важнейшие теплофизические свойства

Познакомимся с основными понятиями и определениями важнейших теплофизических свойств простых горючих и балластных газов, входящих в состав различных видов газового топлива.

1. Молекулярная масса — это сумма атомных масс элементов, входящих в состав молекулы.

2. Элементарный состав газа — массовые доли элементов, приходящихся на 1 кг газа и выраженные в процентах. Массовая доля элемента k , %,

$$g_k = \frac{\mu_k n}{\mu} \cdot 100, \quad (I-1)$$

где μ_k — атомная масса элемента; n — число атомов элемента k в молекуле газа; μ — молекулярная масса газа.

3. Газовая постоянная R , кгс · м/(кг · °С), — работа 1 кг газа в изобарном процессе при нагревании его на 1 °С. Газовая постоянная в уравнении состояния связывает основные параметры газа.

4. Объем киломоля \bar{v} , м³/кмоль, — объем, занимаемый μ кг газа. Объем киломоля идеального газа является постоянной величиной, равной в нормальных условиях 22,4 м³. Для реальных газов объем киломоля несколько отличается от приведенной величины.

5. Плотность ρ , кг/м³, — масса газа в объеме 1 м³. В справочных таблицах теплофизических характеристик как объем киломоля, так и плотность газа приводят для нормальных условий, т. е. для давления 10 330 кгс/м² (760 мм рт. ст.) и температуры 273,15 °К (0 °С).

6. Температура кипения t_k — температура, при которой упругость паров над поверхностью жидкости равна внешнему давлению, т. е. температура равновесия между жидкой и паровой фазами при давлении p .

7. Теплоемкость удельная c — количество тепла, необходимого для нагревания единицы количества тела (газа) на 1 °С. Для газов за единицу количества принимают массу 1 кг (массовая теплоемкость) или 1 м³ в нормальных условиях. Как известно, величина теплоемкости газа зависит от термодинамического

процесса, при котором происходит сообщение тепла. В термодинамических соотношениях и расчетах различают теплоемкость в процессе нагревания газа при постоянном давлении — c_p и при постоянном объеме — c_v .

8. Показатель адиабаты K — отношение теплоемкостей c_p/c_v .

9. Коэффициент теплопроводности λ , ккал/(м·ч·°С), — количество тепла, передаваемого в единицу времени через 1 м² поверхности, нормальной к направлению потока (т. е. мощность теплового потока), при градиенте температуры 1 °С. Коэффициент теплопроводности определяет только молекулярный перенос энергии. Величина λ значительно увеличивается с повышением температуры газа и незначительно зависит от давления.

10. Коэффициент динамической вязкости η , кгс·сек/м², — коэффициент внутреннего трения газа или жидкости, обусловленный внутримолекулярным состоянием, благодаря которому в газе или жидкости, движущихся с деформацией элементарных объемов, возникают силы трения.

В технических расчетах обычно имеют дело с коэффициентом кинематической вязкости ν , представляющим собой отношение коэффициента динамической вязкости к плотности, м²/сек,

$$\nu = \eta/\rho. \quad (I-2)$$

С повышением температуры вязкость газов увеличивается.

Горючие свойства

Весьма важными характеристиками газов являются их горючие свойства. Горение в техническом понимании представляет собой процесс окисления горючих компонентов топлива кислородом воздуха, сопровождающийся выделением тепла. Этот процесс может протекать при определенном уровне энергии молекул горючего и окислителя. Рассмотрим основные понятия.

1. Теплота сгорания сухого газа Q_c , ккал/м³, — количество тепла, выделяющегося при полном сгорании единицы количества топлива. Единицей количества для газового топлива обычно считают 1 м³ при нормальных условиях.

Различают высшую $Q_{в.с}$ и низшую $Q_{н.с}$ теплоту сгорания. Высшая теплота сгорания определяется количеством тепла, выделяющегося при сгорании единицы количества топлива, включая теплоту водяных паров, содержащихся в продуктах сгорания. За основную расчетную величину обычно принимают низшую теплоту сгорания, т. е. теплоту сгорания топлива без учета теплоты конденсации водяных паров при давлении 760 мм рт. ст. и 0 °С.

2. Теоретическое количество воздуха, необходимого для сгорания 1 м³ газа, V_0 , м³/м³, — величина, определяемая из стехиометрического уравнения реакции горения и содержания кислорода в атмосферном воздухе.

3. Калориметрическая температура горения t , °С, — температура, которую могли бы иметь продукты сгорания при полном

сгорании газа с учетом всего тепла, вносимого в топку с действительным количеством воздуха. Калориметрическая температура при $t_b = t_r = 0$ °С и $\alpha = 1$ многими авторами называется жароприводительностью (термин Д. И. Менделеева). В отличие от калориметрической теоретическая температура горения определяется с учетом явления диссоциации CO_2 и H_2O .

4. Температура самовоспламенения t_c , °С, — температура газозвудушной или газокислородной смеси, при которой начинается интенсивный саморазогрев этой смеси за счет цепного развития реакции окисления.

Температура самовоспламенения не является константой, а зависит от давления и состава смеси, наличия в газе примесей и от особенностей ограждающих стенок.

5. Концентрационные пределы воспламенения, %, — минимальный (низший предел N_n) и максимальный (высший предел N_v) — пределы содержания горючего газа в смеси с воздухом или кислородом, когда при зажигании от постороннего источника возможен процесс горения. Концентрационные пределы воспламенения зависят от температуры смеси, наличия балластных примесей и давления.

6. Нормальная скорость распространения пламени u_n , м/сек, — скорость перемещения фронта пламени по нормали к элементу поверхности этого фронта (без образования ударной детонационной волны). Нормальная скорость распространения пламени зависит от природы газа, состава смеси, ее температуры и давления.

7. Объем продуктов сгорания $V_{п.с}$, м³/м³, — стехиометрическая характеристика любого горючего, легко определяемая из уравнения полного сгорания при теоретически необходимом количестве воздуха.

Следует отметить, что такие характеристики простых газов, как температура самовоспламенения, концентрационные пределы воспламенения, нормальная скорость горения, для многих газов исследованы недостаточно полно. Поэтому в литературе можно встретить заметное различие их значений.

§ 1-2.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ГАЗОВОГО ТОПЛИВА И ПРОДУКТОВ ЕГО СГОРАНИЯ

Характеристики газового топлива

Почти все теплофизические характеристики газового топлива могут быть определены, если известен его состав, по свойствам простых газов — компонентов смеси. Основные характеристики и реакции горения простых газов приведены в табл. I-1.

Теплота сгорания смеси простых горючих газов

$$Q = \sum_1^n r_k Q_k, \quad (I-3)$$

ТАБЛИЦА I-4
Основные характеристики горения простых газов

Газ	Реакция	Расход, м ³ /м ³		Количество продуктов сгорания, м ³ /м ³			
		кислорода	воздуха	Углекислый газ	Водяные пары	Азот	Всего
Водород	H ₂ + 0,5O ₂ = H ₂ O	0,500	2,381	—	1,000	1,881	2,881
Окись углерода	CO + 0,5O ₂ = CO ₂	0,500	2,381	1,000	—	1,881	2,881
Метан	CH ₄ + 2O ₂ = CO ₂ + 2H ₂ O	2,000	9,524	1,000	2,000	7,524	10,524
Ацетилен	C ₂ H ₂ + 2,5O ₂ = 2CO ₂ + H ₂ O	2,500	11,905	2,000	1,000	9,405	12,405
Этилен	C ₂ H ₄ + 3O ₂ = 2CO ₂ + 2H ₂ O	3,000	14,286	2,000	2,000	11,286	15,286
Этан	C ₂ H ₆ + 3,5O ₂ = 2CO ₂ + 3H ₂ O	3,500	16,667	2,000	3,000	13,167	18,167
Пропилен	C ₃ H ₆ + 4,5O ₂ = 3CO ₂ + 3H ₂ O	4,500	21,429	3,000	3,000	16,929	22,929
Пропан	C ₃ H ₈ + 5O ₂ = 3CO ₂ + 4H ₂ O	5,000	23,810	3,000	4,000	18,810	25,810
Бутилен	C ₄ H ₈ + 6O ₂ = 4CO ₂ + 4H ₂ O	6,000	28,572	4,000	4,000	22,572	30,572
Бутан	C ₄ H ₁₀ + 6,5O ₂ = 4CO ₂ + 5H ₂ O	6,500	30,953	4,000	5,000	24,453	33,453
Пентан	C ₅ H ₁₂ + 8O ₂ = 5CO ₂ + 6H ₂ O	8,000	38,096	5,000	6,000	30,096	41,096
Сероводород	H ₂ S + 1,5O ₂ = SO ₂ + H ₂ O	1,500	7,143	1,000 (SO ₂)	1,000	5,643	7,643

где r_k — объемные доли горючих компонентов смеси; Q_k — теплота сгорания каждого компонента.

Для высшей теплоты сгорания сухого природного газа эта формула в развернутом виде будет иметь вид, ккал/м³,

$$Q_{в.с} = 95,2\text{CH}_4 + 166,4\text{C}_2\text{H}_6 + 237,0\text{C}_3\text{H}_8 + 308,0\text{C}_4\text{H}_{10} + 378,2\text{C}_5\text{H}_{12} + 61,8\text{H}_2\text{S}. \quad (\text{I-4})$$

Аналогично, низшая теплота сгорания сухого газа, ккал/м³,

$$Q_{н.с} = 85,6\text{CH}_4 + 152,3\text{C}_2\text{H}_6 + 218,0\text{C}_3\text{H}_8 + 283,4\text{C}_4\text{H}_{10} + 348,9\text{C}_5\text{H}_{12} + 57,0\text{H}_2\text{S}, \quad (\text{I-5})$$

где $C_n\text{H}_{2n+2}$ и H_2S — объемные доли соответствующих простых газов, %.

Плотность газового топлива в нормальных условиях, кг/м³,

$$\rho_0 = \sum_1^n r_k \rho_{0k} = 0,01 (0,717\text{CH}_4 + 1,356\text{C}_2\text{H}_6 + 2,000\text{C}_3\text{H}_8 + 2,703\text{C}_4\text{H}_{10} + 3,457\text{C}_5\text{H}_{12} + 1,540\text{H}_2\text{S} + 1,250\text{N}_2 + 1,92\text{CO}_2). \quad (\text{I-6})$$

В пределах тех давлений, при которых горючие газы подаются предприятиям (до 10 кгс/см²), они достаточно точно следуют законам идеальных газов. Поэтому плотность в рабочих условиях может быть подсчитана без учета сжимаемости по формуле, кг/м³,

$$\rho = \rho_0 \frac{p_{\text{бар}} + p_{\text{изб}}}{1,033} \cdot \frac{273}{273 + t}. \quad (\text{I-7})$$

Объемная теплоемкость при постоянном давлении и температурах от -30 до 50 °C, ккал/(м³·°C),

$$c_p = 0,01 (1,550\text{CH}_4 + 2,212\text{C}_2\text{H}_6 + 3,050\text{C}_3\text{H}_8 + 4,310\text{C}_4\text{H}_{10} + 5,133\text{C}_5\text{H}_{12} + 1,294\text{N}_2 + 1,508\text{H}_2\text{S} + 1,601\text{CO}_2). \quad (\text{I-8})$$

Аналогично, теплоемкость при постоянном объеме для тех же условий, ккал/(м³·°C),

$$c_v = 0,01 (1,177\text{CH}_4 + 1,837\text{C}_2\text{H}_6 + 2,675\text{C}_3\text{H}_8 + 4,760\text{C}_5\text{H}_{12} + 0,923\text{N}_2 + 1,232\text{CO}_2 + 1,135\text{H}_2\text{S}). \quad (\text{I-9})$$

Приведенные формулы справедливы только для природных и попутных газов, не имеющих в составе непредельных углеводородов и других горючих газов (например, CO и H₂). В процессе предварительной обработки природных и попутных газов на головных сооружениях газопередачи из них удаляют H₂S и CO₂, в связи с чем эти компоненты из расчетных формул обычно исключаются.

При более высоких температурах теплоемкость

$$c_p = \sum_1^n c_{pk} r_k, \quad (\text{I-10})$$

$$c_v = \sum_1^n c_{vk} r_k, \quad (\text{I-11})$$

где c_{pk} и c_{vk} — теплоемкости каждого компонента при заданной температуре.

Следует иметь в виду, что для природных газов показатели адиабаты сильно меняются в зависимости от температуры. В среднем при температурах 15—25 °C для природных газов с содержанием метана более 90% показатель адиабаты можно принимать $K = 1,30$. Для попутных газов с повышенным содержанием высокомолекулярных углеводородов и умеренным балластом значение K снижается до 1,26—1,28.

Газовая постоянная, кгс/(кг·°C),

$$R = 37,85/\rho_0 \text{ или } R = 848/\mu, \quad (I-12)$$

где ρ_0 — плотность газа при $p_0 = 760$ мм рт. ст. и $t = 0$ °C; μ — молекулярная масса.

Коэффициент динамической вязкости может быть подсчитан по вязкостям составляющих смесь газов только приближенно. По формуле Манна, кгс·сек/м²,

$$\eta = 100 \left/ \left(\sum_1^n \frac{g_k}{\eta_k} \right) \right., \quad (I-13)$$

где g_k — массовая доля компонента в смеси, %; η_k — вязкости компонентов, составляющих смесь, кгс·сек/м².

С увеличением температуры вязкость газов повышается. По Сутерленду,

$$\eta_t = \eta_0 \frac{273+a}{273+t+a} \left(\frac{273+t}{273} \right)^{1,5}, \quad (I-14)$$

где η_t — вязкость при температуре t ; η_0 — вязкость при 0 °C; a — эмпирический коэффициент, зависящий от природы газа; для метана $a = 162$, этана — 226, пропана — 278, бутана — 336, пентана — 377, азота — 107, двуокиси углерода — 250.

Кинематическая вязкость (как и для простых газов), м²/сек,

$$\nu = \eta/\rho, \quad (I-15)$$

где ρ — плотность, кгс·сек²/м⁴.

Очень важное значение в вопросах сжигания газа имеют концентрационные пределы воспламенения газоздушных смесей. По Ле Шателье, для смеси горючих газов (без балласта) пределы воспламенения смеси (верхний или нижний)

$$N_{см} = 100 \left/ \left(\sum_1^n \frac{r_k}{N_k} \right) \right., \quad (I-16)$$

где N_k — пределы воспламенения (соответственно верхние или нижние) отдельных компонентов горючей газовой смеси.

При наличии в газе балласта приближенные значения пределов воспламенения

$$N_{см, б} = N_{см} \frac{\left(1 + \frac{B}{100-B} \right)}{100 + N_{см} \frac{B}{100-B}}, \quad (I-17)$$

где $N_{см}$ — предел воспламенения горючей части газа; B — суммарное содержание балластных примесей.

Нижний предел воспламенения углеводородов и их смесей, %, может быть подсчитан также по формуле.

$$N_H = 49\,000/Q_{в,г}, \quad (I-18)$$

где $Q_{в,г}$ — высшая теплота сгорания горючей части газа, ккал/м³.

Пределы воспламенения расширяются с увеличением температуры. При нагреве смеси выше температуры самовоспламенения ее горючие компоненты вступают в реакцию с кислородом независимо от их соотношения.

Точный аналитический подсчет температуры самовоспламенения природного газа невозможен, хотя температуры самовоспламенения его компонентов для определенных условий известны. Можно принять, что искомая температура лежит вблизи температур самовоспламенения компонентов; для большинства природных газов она колеблется от 600 до 800 °C, понижаясь для жирных попутных газов.

Теоретическое количество воздуха, необходимого для сгорания, объем и состав продуктов сгорания на 1 м³ газа легко могут быть определены из стехиометрического уравнения реакции горения.

Теоретическое количество кислорода, необходимого для сгорания, м³/м³,

$$V_{O_2,т} = 0,01 \left[\sum (n + 0,25m) C_n H_m + 1,5H_2S \right]. \quad (I-19)$$

Учитывая, что в атмосфере воздуха содержится 21% кислорода, количество воздуха, теоретически необходимого для полного сгорания 1 м³ топлива, м³/м³,

$$V_0 = 0,0476 \left[\sum (n + 0,25m) C_n H_m + 1,5H_2S \right]. \quad (I-20)$$

Продукты полного сгорания

Количество двуокиси углерода, образующейся при сгорании 1 м³ газового топлива, зависит от содержания углерода в компонентах смеси и в балласте топлива, т. е.

$$V_{CO_2} = 0,01 \left(\sum n C_n H_m + CO_{2,т} \right). \quad (I-21)$$

При наличии в газовом топливе сероводорода в состав продуктов сгорания входит, м³/м³,

$$V_{SO_2} = 0,01 H_2S. \quad (I-22)$$

Количество образующихся водяных паров складывается из объема паров H₂O, полученных в результате сгорания водорода, входящего в углеводородные соединения. Кроме того, в продуктах сгорания будут водяные пары, содержащиеся в газовом топливе

в виде балласта d_T и поступившие с воздухом d_B . В итоге общее количество водяных паров, $\text{м}^3/\text{м}^3$,

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 0,01 [2\text{CH}_4 + 0,5 \sum m\text{C}_n\text{H}_m + \text{H}_2\text{S} + 0,124(d_T + \alpha V_0 d_B)]. \quad (\text{I-23})$$

Следует заметить, что при сжигании природных газов объем водяных паров, поступающих с воздухом и с балластом топлива,

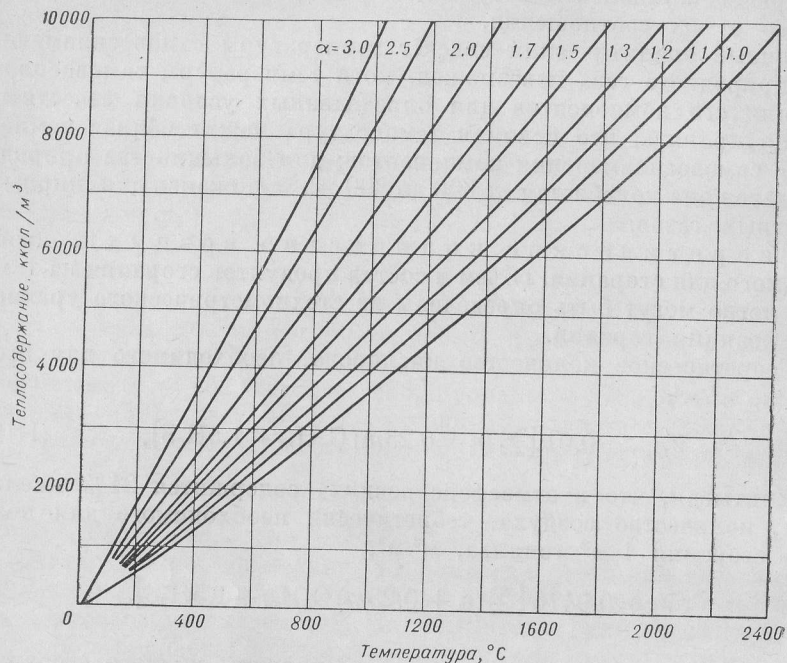


Рис. I-1. Диаграмма продуктов сгорания метана.

обычно очень незначителен по сравнению с объемом паров, получившихся в результате реакции горения, а потому обычно его не учитывают.

Количество кислорода V_{O_2} , входящего в состав продуктов сгорания, определяется коэффициентом избытка воздуха α , при котором ведется процесс горения.

$$V_{\text{O}_2} = 0,21(\alpha - 1)V_0. \quad (\text{I-24})$$

Содержание азота определяется также в зависимости от коэффициента избытка воздуха и наличия N_{2T} в балласте топлива:

$$V_{\text{N}_2} = 0,79\alpha V_0 + 0,01\text{N}_{2T}. \quad (\text{I-25})$$

Полный объем продуктов сгорания 1 м^3 газового топлива, $\text{м}^3/\text{м}^3$,

$$V_r = V_{\text{сух}} + V_{\text{H}_2\text{O}} = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{SO}_2} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{O}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}}. \quad (\text{I-26})$$

При определении состава продуктов сгорания с помощью газоанализатора водяные пары конденсируются в газозаборной трубке и в самом газоанализаторе, поэтому анализ дает состав только сухих продуктов сгорания. Объем сухих продуктов полного сгорания

$$V_{\text{сух}} = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{SO}_2} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{O}_2} = V_{\text{RO}_2} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{O}_2},$$

а содержание в нем отдельных газов, % по об.,

$$\text{RO}_2' = \frac{V_{\text{RO}_2}}{V_{\text{сух}}} \cdot 100; \quad \text{O}_2' = \frac{V_{\text{O}_2}}{V_{\text{сух}}} \cdot 100 \quad \text{и} \quad \text{N}_2' = \frac{V_{\text{N}_2}}{V_{\text{сух}}} \cdot 100.$$

Энтальпия (теплосодержание) I продуктов полного сгорания, отнесенная к 1 м^3 газового топлива, определяется для заданной температуры по объемным теплоемкостям c_p , значения которых следует брать из таблиц или графиков теплофизических свойств газов или же подсчитывать по формулам зависимости теплоемкости от температуры.

$$I = \sum V c_p t = V_{\text{CO}_2} c_{\text{CO}_2} t + V_{\text{SO}_2} c_{\text{SO}_2} t + V_{\text{N}_2} c_{\text{N}_2} t + V_{\text{O}_2} c_{\text{O}_2} t + V_{\text{H}_2\text{O}} c_{\text{H}_2\text{O}} t. \quad (\text{I-27})$$

На рис. I-1 дана диаграмма для определения теплосодержания продуктов сгорания метана.

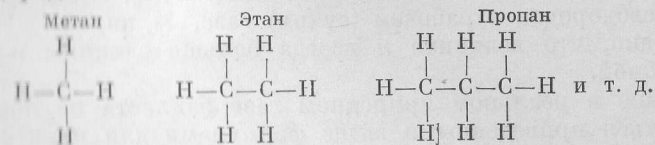
§ 1-3.

РАСЧЕТЫ ПО УГЛЕРОДНОМУ ЧИСЛУ

Принадлежность всех углеводородов, составляющих горючую часть природного газа, к одному гомологическому ряду позволяет упростить ряд важнейших зависимостей, выражающих теплофизические свойства природного газа, и определить их, не зная содержания отдельных компонентов в нем. Это возможно благодаря тому, что углеводороды метанового ряда (алканы) имеют общую формулу $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$, где n — так называемое углеродное число. Профессором Г. Ф. Кнорре [57] разработан метод определения характеристик природного газа и продуктов его сгорания по углеродному числу.

Расчет свойств природных газов

Существует простая зависимость теплоты сгорания углеводорода метанового ряда от углеродного числа. Структура молекул углеводородов может быть представлена в следующем виде:



Метан CH_4 имеет 4 связи типа С—Н. В каждом последующем члене ряда к молекуле предыдущего углеводорода добавляется метиленовая группа CH_2 , дающая 3 дополнительные связи. Число связей в любом алкане $S = 3n + 1$, а число добавочных (к метану) связей $\Delta S = 3n + 1 - 4 = 3(n - 1)$. Возникновение каждой новой связи требует затраты энергии, причем величина этой энергии примерно одинакова — в среднем 52,6 ккал, что дает $52,6 \cdot 3 = 157,8$ ккал на каждую метиленовую группу.

Таким образом, теплота сгорания любого углеводорода метанового ряда может быть определена как сумма теплоты сгорания метана и произведения энергии, приходящейся на метиленовую группу, на число добавочных метиленовых групп. Несложные расчеты, подробно рассмотренные в работе [80], дают следующий ряд формул: высшая теплота сгорания (в нормальных условиях), ккал/м³,

$$Q_{\text{в}} = \frac{157,8(n-1) + 212,8}{22,4} \cdot 1000 = 7050n + 2450; \quad (\text{I-28})$$

округленно низшая теплота сгорания, ккал/м³,

$$Q_{\text{н}} = 6600n + 1950; \quad (\text{I-29})$$

молекулярная масса (в нормальных условиях)

$$\mu = 12n + 2n + 2 = 14n + 2; \quad (\text{I-30})$$

плотность (в нормальных условиях), кг/м³,

$$\rho_0 = \frac{\mu}{22,4} = \frac{14n+2}{22,4} = 0,625n + 0,089. \quad (\text{I-31})$$

Эти формулы справедливы для любого углеводорода метанового ряда (алкана), а также для смеси этих углеводородов. Под углеродным числом n для смеси следует понимать средневзвешенное число атомов углерода в условном углеводороде $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$, термодинамические и горючие свойства которого такие же, как и свойства реальной органической части природного газа.

Углеродное число сравнительно просто может быть определено с помощью любого газоанализатора с дожиганием [80] или же подсчитано по известному объемному составу природного газа.

$$n = \frac{\text{CH}_4 + 2\text{C}_2\text{H}_6 + 3\text{C}_3\text{H}_8 + 4\text{C}_4\text{H}_{10} + 5\text{C}_5\text{H}_{12} + \dots}{\text{CH}_4 + \text{C}_2\text{H}_6 + \text{C}_3\text{H}_8 + \text{C}_4\text{H}_{10} + \text{C}_5\text{H}_{12} + \dots} = \frac{\sum n\text{C}_n\text{H}_{2n+2}}{r}, \quad (\text{I-32})$$

где r — органическая часть газа, %; CH_4 , C_2H_6 , C_3H_8 , C_4H_{10} — доли углеводородов в рабочем (сухом) газе, % по об.

Очевидно, что величина n всегда больше единицы и может быть дробной.

Наличие в реальном природном газе балласта не позволяет пользоваться приведенными выше формулами для практических

расчетов. Как было указано, природные газы состоят только из углеводородов метанового ряда и азота, так как водяные пары, двуокись углерода и сероводород удаляются в процессе очистки газа. Если заменить всю сумму углеводородов природного газа одним условным углеводородом $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$, то его состав может быть выражен суммой $r+B$, в которой горючая часть $r = \text{C}_n\text{H}_{2n+2} = 100 - B$, балласт $B = \text{N}_{2\text{T}}$.

С учетом балласта основные характеристики сухого природного газа могут быть подсчитаны по следующим формулам: высшая теплота сгорания (округленно), ккал/м³,

$$Q_{\text{в.с}} = (70,5n + 24,5)r; \quad (\text{I-33})$$

низшая теплота сгорания, ккал/м³,

$$Q_{\text{н.с}} = (66,0n + 19,5)r; \quad (\text{I-34})$$

плотность (в нормальных условиях), кг/м³,

$$\rho_0 = (0,625n + 0,090) \frac{r}{100} + 0,0125\text{N}_{2\text{T}}; \quad (\text{I-35})$$

газовая постоянная, кгс·м/(кг·°С),

$$R = \frac{37,85}{\rho_0} = \frac{3785}{(0,625n + 0,090)r + 1,25\text{N}_{2\text{T}}}; \quad (\text{I-36})$$

кажущаяся молекулярная масса

$$\mu = 22,4\rho_0 = (0,14n + 0,02)r + 0,28\text{N}_{2\text{T}}. \quad (\text{I-37})$$

Объемная теплоемкость c_p , показатель адиабаты K и кинематическая вязкость ν газа получены в результате аппроксимирования этих величин для конкретных углеводородов метанового ряда и учета балластных газов (для диапазона температур 0—50 °С): объемная теплоемкость при постоянном давлении, ккал/(м³·°С),

$$c_p \approx 0,185(n + 1); \quad (\text{I-38})$$

более точно (для сильно забалластированных газов)

$$c_p = 0,185(n + 1) \frac{r}{100} + 0,003\text{N}_{2\text{T}}; \quad (\text{I-39})$$

показатель адиабаты

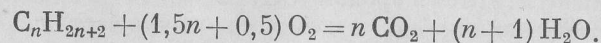
$$K \approx 1,38 - 0,08n; \quad (\text{I-40})$$

кинематическая вязкость, м²/сек,

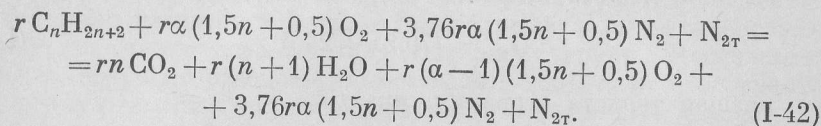
$$\nu = \left(\frac{16}{n} - 1,5 \right) \cdot 10^{-6}. \quad (\text{I-41})$$

Расчет характеристик горения

Соотношения, характеризующие горение забалластированного природного газа, могут быть получены в результате обработки исходного стехиометрического уравнения горения (в общем виде)



С учетом атмосферного азота, а также сгорания с избыточным количеством воздуха это уравнение (для забалластированного природного газа) примет вид



Последнее уравнение позволяет без труда определить как состав и объем продуктов сгорания, так и необходимое для горения количество воздуха.

Ниже приводится сводка формул, определяющих основные показатели горения и свойства продуктов сгорания. Из уравнения (I-42) теоретически необходимое количество воздуха, м³/м³,

$$V_0 = \frac{r}{100} (7,2n + 2,4). \quad (I-43)$$

С другой стороны, по формуле В. Г. Шухова

$$V_0 = a Q_{н. п.},$$

или при $Q_{н. п.} = Q_{н. с.}$

$$V_0 = a Q_{н. с.}$$

Тогда с учетом формул (I-34) и (I-43)

$$a = \frac{V_0}{Q_{н. п.}} = \frac{(7,2n + 2,4) \frac{r}{100}}{(6600n + 1950) \frac{r}{100}} = \frac{7,2n + 2,4}{6600n + 1950}.$$

При изменении n от 1,0 до 2,0 коэффициент a меняется от $1,125 \times 10^{-3}$ до $1,11 \cdot 10^{-3}$ м³/ккал. В среднем можно принять $a = 1,12 \cdot 10^{-3}$ м³/ккал.

Аналогично, выражая V_0 через высшую теплоту сгорания горючей части газа $Q_{в. г.}$, получаем

$$V_0 = a_1 Q_{в. г.} = a_1 (7050n + 2450),$$

где

$$a_1 = \frac{7,2n + 2,4}{7050n + 2450} \approx 1,01 \cdot 10^{-3}.$$

Следовательно,

$$V_0 = 1,12 \cdot 10^{-3} Q_{н. п.} \quad (I-44)$$

или

$$V_0 = 1,01 \cdot 10^{-3} Q_{в. г.} \quad (I-45)$$

Минимальный объем сухих газов при полном сгорании, м³/м³,

$$V_{c \min} = (6,6n + 1,9) \frac{r}{100} + 0,01 N_{2T}. \quad (I-46)$$

Действительный объем сухих газов, м³/м³,

$$V_c = [6,6n + 1,9 + (\alpha - 1)(7,2n + 2,4)] \frac{r}{100} + 0,01 N_{2T}. \quad (I-47)$$

Объем водяных паров (без учета водяных паров воздуха), м³/м³,

$$V_{в. п.} = (n + 1) \frac{r}{100}. \quad (I-48)$$

Действительный полный объем продуктов сгорания, м³/м³,

$$V_r = [7,6n + 2,9 + (\alpha - 1)(7,2n + 2,4)] \frac{r}{100} + 0,01 N_{2T}. \quad (I-49)$$

Минимальные объемы сухих $V_{c \min}$ и влажных $V_{r \min}$ продуктов сгорания могут так же, как и теоретически необходимое количество воздуха, быть выражены с достаточной точностью через теплоту сгорания газа (без учета азота в природном газе).

$$V_{c \min} = \frac{Q_{н. п.}}{\frac{Q_{н. п.}}{V_{c \min}}} = \frac{Q_{н. п.}}{\left(\frac{6600n + 1950}{6,6n + 1,9} \right)} \approx \frac{Q_{н. п.}}{1000}. \quad (I-50)$$

В пределах $n = 1,0 \div 1,5$ (с погрешностью не более 1%)

$$V_{r \min} = 1,22 Q_{н. п.} / 1000. \quad (I-51)$$

Отношение минимального объема сухих продуктов сгорания к теоретически необходимому объему воздуха

$$Y = V_{c \min} / V_0 = (6,6n + 1,9) / (7,2n + 2,4) \approx 0,89. \quad (I-52)$$

Учитывая некоторое содержание азота в природном газе в пределах значений $n = 1,0 \div 1,5$, можно принять (с погрешностью не более 1,0%)

$$Y = 0,9. \quad (I-53)$$

Объем двуокиси углерода, м³/м³,

$$V_{CO_2} = nr / 100. \quad (I-54)$$

Максимальная объемная доля двуокиси углерода в сухих продуктах сгорания (при полном сгорании), %,

$$CO_{2 \max} = \frac{100nr}{(6,6n + 1,9)r + N_{2T}}. \quad (I-55)$$

Характеристика топлива

$$\beta = \frac{21}{CO_{2 \max}} - 1 = \frac{0,21 [(6,6n + 1,9)r + N_{2T}]}{nr} - 1. \quad (I-56)$$

Коэффициент избытка воздуха при полном сгорании (по данным газового анализа на CO_2)

$$\alpha \approx \frac{\text{CO}_2 \text{ max}}{\text{CO}_2} = \frac{nr}{(6,6n + 1,9)r + N_{2T}} \cdot \frac{100}{\text{CO}_2} \quad (\text{I-57})$$

Используя приближенную линейную зависимость теплоемкости от температуры, можно получить следующее выражение энтальпии продуктов сгорания на 1 м^3 газа-топлива [80], ккал/м³:

$$I = \sum V c_p t = \{[(2,21n + 0,735)\alpha r + (0,291n + 0,196)r + 0,409\text{CO}_{2T} + 0,314\text{N}_{2T}] + [(0,207n + 0,069)\alpha r + (0,113n + 0,038)r + 0,113\text{CO}_{2T} + 0,026\text{N}_{2T}] t \cdot 10^{-3}\} \frac{t}{100} \quad (\text{I-58})$$

При сгорании чистого метана энтальпия продуктов сгорания, ккал/м³,

$$I = [2,97\alpha + 0,538 + (0,277\alpha + 0,150)t \cdot 10^{-3}] t \quad (\text{I-59})$$

В ряде случаев при теплотехнических расчетах приходится пересчитывать объемный состав топливного газа на массовый элементарный состав. Формулы пересчета:

$$C = 12nr/\mu; \quad (\text{I-60})$$

$$H = 2(n + 1)r/\mu; \quad (\text{I-61})$$

$$N = 28N_{2T}/\mu. \quad (\text{I-62})$$

График продуктов сгорания газового топлива

Как было указано, при небольших нарушениях процесса горения основным продуктом неполного сгорания является окись углерода. Доля H_2 , CH_4 и других продуктов недожога относительно невелика. Это обстоятельство позволяет построить график простого анализа продуктов сгорания природного газа. С его помощью по замеренным величинам CO_2 и $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ можно легко найти содержание CO и коэффициент избытка (расхода) воздуха. Содержания CO_2 и O_2 легко определяются любым простейшим газоанализатором. На рис. I-2 приведен такой график, очень удобный при наладке работы горелок или для быстрой оценки совершенства сгорания газа, а на рис. I-3 показана схема его построения.

При построении графика пренебрегаем наличием в топливном газе азота, так как его содержание, отнесенное к объему продуктов сгорания даже сильно забалластированных газов, не превосходит 1,0—1,5% и практически не отражается на результатах определения. Для построения графика выразим CO_2 в продуктах сгорания через $\text{CO}_{2\text{max}}$ и характеристику Y .

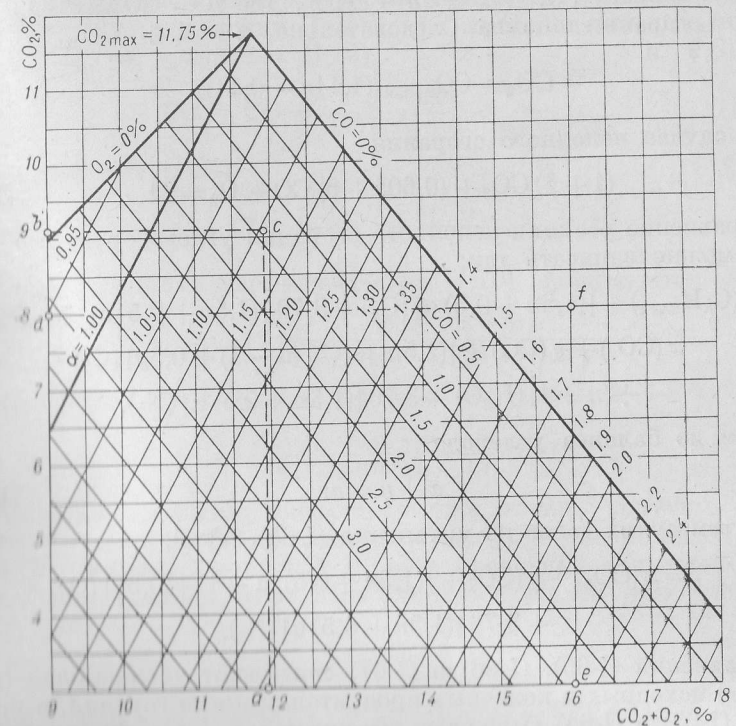


Рис. I-2. Расчетный график простого анализа продуктов сгорания природного газа (метана).

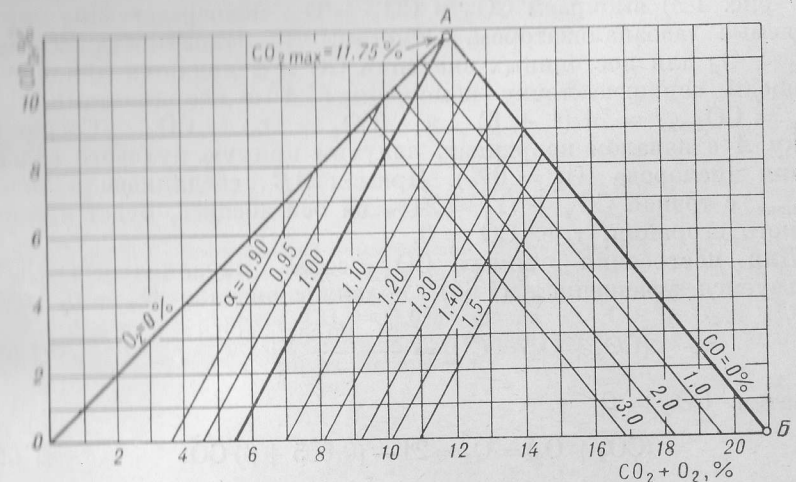


Рис. I-3. Схема построения графика простого анализа продуктов сгорания природного газа (метана).

Как известно, $\alpha = 1 + (h - 1) Y$, где $h = \text{CO}_{2\text{max}}/\text{CO}_2$ при полном сгорании топлива. Следовательно, $\alpha = 1 + (\text{CO}_{2\text{max}}/\text{CO}_2 - 1) \cdot 0,9$ и

$$\text{CO}_2 = \text{CO}_{2\text{max}} / (1,11\alpha - 0,11). \quad (\text{I-63})$$

В случае неполного сгорания

$$(1 + \beta) \text{CO}_2 + (0,605 + \beta) \text{CO} + \text{O}_2 = 21. \quad (\text{I-64})$$

Уравнение реакции неполного сгорания углеводорода в общем виде можно записать так:

$$\begin{aligned} (\text{C}_n\text{H}_{2n+2}) + [(1,5n + 0,5)\alpha] (\text{O}_2) + 3,76 [(1,5n + 0,5)\alpha] (\text{N}_2) = \\ = x (\text{CO}_2) + y (\text{CO}) + [(1,5n + 0,5)(\alpha - 1) + 0,5y] (\text{O}_2) + \\ + (n + 1) (\text{H}_2\text{O}) + 3,76 [(1,5n + 0,5)\alpha] (\text{N}_2), \end{aligned} \quad (\text{I-65})$$

причем из баланса углерода

$$x + y = n. \quad (\text{I-66})$$

Объем сухих газов из уравнения (I-65), $\text{м}^3/\text{м}^3$,

$$\begin{aligned} V_{\text{с.г}} = x (\text{CO}_2) + y (\text{CO}) + [(1,5n + 0,5)(\alpha - 1) + 0,5y] (\text{O}_2) + \\ + 3,76 [(1,5n + 0,5)\alpha] (\text{N}_2). \end{aligned} \quad (\text{I-67})$$

Уравнения (I-65), (I-66) и (I-67) связывают числа молей (или объемы) исходных и конечных продуктов реакции горения, а уравнения (I-63) и (I-64) выражают объемные доли продуктов горения в сухих газах.

В качестве координатных осей при построении номограммы (см. рис. I-3) выбираем CO_2 и $\text{CO}_2 + \text{O}_2$, непосредственно определяемые газоанализатором. Отметим, что зависимость CO_2 от $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ для постоянных значений CO и α является линейной. Наносим верхнюю точку номограммы A с координатами, %, $\text{CO}_2 = \text{CO}_{2\text{max}} = 21/(1 + \beta)$ и $(\text{CO}_2 + \text{O}_2) = \text{CO}_2$. Соединив точку A с началом координат, получим прямую нулевого содержания кислорода ($\text{O}_2 = 0\%$). Прямая AB , соединяющая точку $\text{CO}_{2\text{max}}$ с точкой $\text{CO}_2 + \text{O}_2 = 21\%$ на оси абсцисс, будет линией полного сгорания, т. е. $\text{CO} = 0$.

Для построения прямых $\text{CO} = \text{const}$, параллельных AB , пользуемся уравнением (I-64), положив вначале $\text{O}_2 = 0$, т. е.

$$(\text{CO}_2 + \text{O}_2) = \text{CO}_2 = \frac{21 - (0,605 + \beta) \text{CO}}{1 + \beta}, \quad (\text{I-68})$$

а затем $\text{CO}_2 = 0$, т. е.

$$(\text{CO}_2 + \text{O}_2) = \text{O}_2 = 21 - (0,605 + \beta) \text{CO}. \quad (\text{I-69})$$

Для построения линий $\alpha = \text{const}$ находим точки их пересечения с линией $\text{CO} = 0$ из соотношения (I-63). Для нахождения

точек пересечения линий $\alpha = \text{const}$ (при $\alpha < 1,0$) и $\text{O}_2 = 0$ решаем совместно уравнения (I-64), (I-67) и (I-68). Объемная доля $(\text{CO}_2 + \text{CO})$ из уравнения (I-65)

$$\text{CO}_2 + \text{CO} = \frac{100n}{3,76(1,5n + 0,5)\alpha + n}, \quad (\text{I-70})$$

но из формулы (I-64)

$$\text{CO} = \frac{21 - (1 + \beta) \text{CO}_2}{0,605 + \beta}. \quad (\text{I-71})$$

Тогда, подставив формулу (I-71) в (I-70), найдем, что

$$\text{CO}_2 = 53,16 - \frac{100(0,605 + \beta)n}{1,485(1,5n + 0,5)\alpha + 0,395n}. \quad (\text{I-72})$$

Аналогично при $\text{CO}_2 = 0$ и $y = n$ из уравнения (I-67)

$$\text{O}_2 = \frac{(1,5n + 0,5)\alpha - n - 0,5}{4,76(1,5n + 0,5)\alpha - 0,5} \cdot 100. \quad (\text{I-73})$$

Соединив прямыми соответствующие точки, получим сетку линий $\alpha = \text{const}$ и $\text{CO} = \text{const}$ (см. рис. I-3). Для метана $n = 1$, $\beta = 0,787$ и $\text{CO}_{2\text{max}} = 11,75\%$. Тогда уравнения для построения номограммы анализа продуктов сгорания метана (см. рис. I-2) имеют вид:

для $\text{CO} = \text{const}$

$$\text{CO}_2 = 11,75 - 0,78\text{CO} \quad \text{и} \quad \text{O}_2 = 21 - 1,392\text{CO};$$

для $\alpha = \text{const}$ при $\alpha > 1,0$

$$\text{CO}_2 = 11,75 / (1,11\alpha + 0,11);$$

при $\alpha < 1,0$

$$\text{CO}_2 = 53,16 - 100 / (2,13\alpha + 0,284);$$

при $\alpha \leq 1,0$

$$\text{O}_2 = \frac{2\alpha - 1,5}{9,52\alpha - 0,5} \cdot 100.$$

Примеры пользования номограммой, приведенной на рис. I-2.

1. По данным анализа $\text{CO}_2 = 9,1\%$ (точка b), $\text{CO}_2 + \text{O}_2 = 11,9\%$ (точка a). По номограмме находим (точка c): $\text{CO} = 1,4\%$ и $\alpha = 1,105\%$.
2. По данным анализа $\text{CO}_2 = 8,0\%$ (точка d), $\text{CO}_2 + \text{O}_2 = 16,0\%$ (точка e). Так как точка f с этими координатами лежит вне треугольника, данные анализа следует считать неверными.

Горение газового топлива представляет собой совокупность сложных аэродинамических, тепловых и химических процессов. Первый из них — процесс смесеобразования — предшествует горению, осуществляясь до ввода газа и воздуха в топку или же одновременно с подачей газа и воздуха.

Подготовка горючей смеси газа с необходимым количеством воздуха может осуществляться как вне топки, без теплового воздействия на процесс смесеобразования, так и в зоне горения, т. е. в топке, где одновременно с образованием локальных объемов горючей смеси сразу же начинается горение. Если в первом случае в зону горения непрерывно поступает заранее подготовленная смесь, то во втором случае газ и необходимое количество воздуха подводятся к зоне горения раздельно. Очевидно, возможны и различные промежуточные схемы организации горения.

Горение заранее подготовленной смеси нередко условно называют кинетическим, а горение, протекающее одновременно со смесеобразованием в топке, — диффузионным, так как это смесеобразование включает процессы турбулентной (в заключительной стадии — молекулярной) диффузии. Эти термины введены Г. Ф. Кнорре и обобщенно характеризуют процессы смешения и горения, хотя в ряде случаев не отражают действительных процессов, протекающих при горении заранее приготовленной смеси, так как и в последнем случае зачастую интенсивность процесса определяется не законами химической кинетики, а законами теплообмена и диффузии.

Процесс смесеобразования подчиняется законам молекулярной и турбулентной диффузии. В промышленных установках преобладает последняя. Полная продолжительность процесса диффузионного горения $\tau = \tau_d + \tau_{гор}$, где τ_d — продолжительность диффузии горючего газа и окислителя, приводящей к созданию однородной смеси; $\tau_{гор}$ — продолжительность горения, начиная от разогрева смеси до завершения реакции. Обычно разогрев протекает одновременно со смесеобразованием.

Очевидно, что полная продолжительность процесса при кинетическом горении определяется совокупностью тепловых и химических факторов и подчиняется, с известными ограничениями,

законам химической кинетики. Под кинетикой химической реакции понимают совокупность закономерностей, определяющих ход реакции во времени. Для реакций, протекающих в потоках, течение во времени равнозначно их течению в пространстве.

Схемы организации двух видов горения приведены на рис. II-1. Если происходит предварительное смешение газа с недостаточным количеством воздуха, то полное сгорание возможно лишь при дополнительном подводе последнего к факелу, т. е. и в этом случае горение будет в известной степени иметь диффузионный характер. Несколько иная картина получается при предварительном смешении газа с необходимым количеством воздуха, но при незавершенности этого смешения. В этом случае оно будет заканчиваться в пределах топки, хотя дополнительная подача воздуха

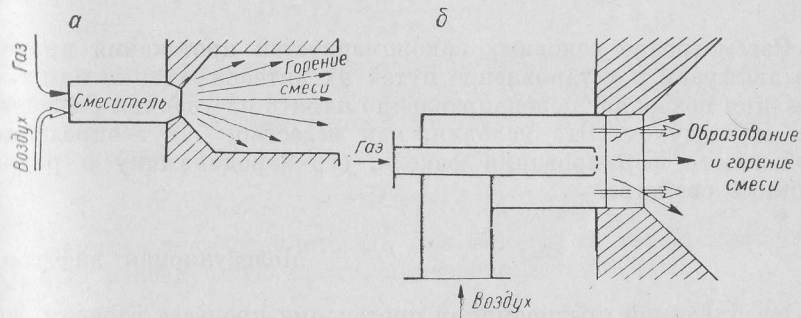


Рис. II-1. Схемы организации горения.

а — заранее подготовленной смеси; б — при раздельной подаче газа и воздуха.

и не потребуется. Оба последних вида горения являются промежуточными между кинетическим и диффузионным, но каждый из них обладает своей спецификой, о которой будет сказано ниже.

Реакции окисления горючих элементов топлива могут протекать при низких температурах за счет соударения отдельных немногочисленных молекул, обладающих энергией, превышающей минимальный уровень, достаточный для разрушения внутримолекулярных связей. Однако такое окисление происходит крайне медленно и в обычных условиях не приводит к развитию процесса.

Вторым видом медленного окисления горючих элементов при температурах, не достигающих температуры воспламенения, является горение на поверхности катализатора. Хотя процесс каталитического горения может протекать достаточно интенсивно, он все же не является процессом горения в техническом его понимании и может интересовать теплотехников главным образом в точки зрения применения его для избирательного сжигания газов в целях анализа.

Отличительной чертой технического горения топлива является то, что оно, раз начавшись, способно продолжаться, обеспечивая

за счет большого тепловыделения поддержание температуры процесса выше температуры самовоспламенения смеси, несмотря на отвод тепла. Естественно, что условием протекания такого процесса является непрерывное поступление в зону горения и вовлечение в процесс свежего топлива и воздуха.

Из сказанного выше следует, что в целом горение включает два вида различных процессов: образование смеси горючего газа с окислителем, в частности кислородом воздуха, и реакции окисления, включая необходимый нагрев реагирующих газов.

§ II-2.

ДИФФУЗИОННЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ГАЗАХ И ГАЗОВЫХ ПОТОКАХ

Рассмотрение основных закономерностей протекания процессов диффузии и установление путей их интенсификации или торможения позволяет целенаправленно влиять на условия смешения газа с воздухом. Эти условия, как известно, будут определять особенности формирования факела, его аэродинамику и радиационные свойства.

Молекулярная диффузия

Необходимой предпосылкой протекания процесса горения газа является, помимо необходимого уровня энергии активации, возможность соударения реагирующих молекул. Это условие может быть обеспечено только в том случае, когда газ и необходимое количество воздуха хорошо перемешаны.

Процесс взаимного проникновения молекул одного газа в другой, приводящий к образованию весьма совершенной смеси, будет иметь место как в неподвижных газах, так и в газовых потоках. В первом случае, а также в ламинарных газовых потоках этот процесс протекает за счет молекулярной диффузии. В турбулентных потоках наблюдается так называемая турбулентная или молярная диффузия. Однако и при турбулентной диффузии, приводящей к перемешиванию конечных объемов газа, содержащих миллиарды молекул, процесс полного, т. е. молекулярного, перемешивания заканчивается только за счет молекулярной диффузии.

При молекулярной диффузии смешение газов определяется скоростью движения молекул и длиной их свободного пробега. Хотя скорость движения молекул в среднем очень велика, длина пути свободного пробега их очень мала, составляя десятитысячные доли миллиметра и менее. Поэтому молекулярная диффузия в условиях умеренных градиентов концентраций протекает очень медленно.

Количество газа, диффундирующего из одного слоя в другой

через воображаемую разделительную поверхность, может быть определено по формуле, выражающей закон Фика:

$$M = -D \frac{dC}{dn}, \quad (II-1)$$

где D — коэффициент молекулярной диффузии, $\text{м}^2/\text{сек}$; $\frac{dC}{dn}$ — градиент концентрации диффундирующего газа в направлении нормали к разделительной поверхности, $\text{кг}/\text{м}^4$.

С повышением температуры величина коэффициента молекулярной диффузии, а следовательно, и интенсивность диффузии растет. В достаточно широком диапазоне величина D может быть определена по формуле Сутерленда:

$$D = D_0 \frac{273+a}{T+a} \left(\frac{T}{273} \right)^{1,5}, \quad (II-2)$$

где D_0 — коэффициент молекулярной диффузии при $T = 273^\circ\text{K}$; значения коэффициента a те же, что в формуле (I-14).

Коэффициент молекулярной диффузии может быть выражен через среднюю скорость молекул и длину их свободного пробега:

$$D = vl. \quad (II-3)$$

Величина коэффициента D_0 для некоторых газов, диффундирующих в воздушную среду, приведена в табл. II-1.

ТАБЛИЦА II-1
Значения коэффициентов переноса для основных газов
(при 760 мм рт. ст. и 0°C)

Газ	Коэффициент			
	кинетической вязкости, $10^6 \text{ кгс}\cdot\text{сек}/\text{м}^2$	кинематической вязкости, $10^6 \text{ м}^2/\text{сек}$	молекулярной диффузии, $10^6 \text{ м}^2/\text{сек}$	теплопроводности, $10^8 \text{ ккал}/(\text{м}\cdot\text{ч}\cdot\text{X}^\circ\text{C})$
Водород	0,85	93,0	0,611	148
Оксид углерода	1,69	13,3	0,175	20,0
Метан	1,06	14,5	0,196	26,4
Этан	0,88	6,41	0,108	16,3
Пропан	0,77	3,81	0,088	13,1
n-Бутан	0,70	2,63	0,075	11,4
Этилен	0,96	7,55	—	11,0
Пропилен	0,78	3,99	—	—
Диоксид углерода	1,43	7,09	0,138	12,6
Азот	1,70	13,3	—	20,9
Кислород	1,98	13,6	0,178	21,2
Водный пар (при 100°C)	—	—	0,220	20,4
Сухой воздух	1,75	13,3	—	21,0

Коэффициент молекулярной диффузии зависит не только от свойств диффундирующего газа, но и от свойств среды, в которой проходит диффузия. В случае диффузии газа в среду с молекулярной массой, отличной от молекулярной массы диффундирующего газа, коэффициент диффузии

$$D = \frac{1}{1 - m_r \frac{\mu_c - \mu_r}{\mu_r}} D',$$

где D — коэффициент диффузии газа в газовую среду с молекулярной массой μ_c ; D' — коэффициент диффузии в среду с молекулярной массой μ_r ; m_r — массовая концентрация диффундирующего газа в среде, куда диффундирует газ.

Указанное уравнение справедливо для одномерной диффузии в неподвижную среду. В общем виде при наличии источника диффундирующего газа с производительностью $M_{ист}$ уравнение диффузии принимает вид

$$\frac{dC}{d\tau} = M_{ист} + D \nabla^2 C,$$

где $\frac{dC}{d\tau} = \frac{\partial C}{\partial \tau} + W_x \frac{\partial C}{\partial x} + W_y \frac{\partial C}{\partial y} + W_z \frac{\partial C}{\partial z}$ — так называемая субстациональная производная, выражающая полное изменение концентрации C в данной точке с течением времени при движении газа; $\nabla^2 C = \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2}$ — оператор Лапласа, т. е. сумма вторых частных производных изменений концентрации в пространстве.

В случае одновременного движения потока в установившемся режиме, т. е. $dC/d\tau = 0$, уравнение принимает вид

$$W_x \frac{dC}{dx} = M_{ист} + D \frac{d^2 C}{dx^2}.$$

Газовые струи и турбулентная диффузия

Турбулентная диффузия выражается в переносе молей газа в другую среду за счет турбулентных пульсаций. Турбулентные пульсации и турбулентная диффузия имеют место как при турбулентном течении по каналу или трубопроводу, так и при истечении свободной затопленной струи.

Для анализа работы газовых горелок и их расчета особый интерес представляют закономерности истечения турбулентных затопленных струй и массообмен в них. Свободная затопленная струя образуется, если газ вытекает через сопло в неограниченное пространство. При малых значениях числа Рейнольдса ($Re \leq 2300$) возникает ламинарная затопленная струя. В выходном сечении сопла скорость такой струи изменяется по тому же

закону, что и в трубопроводе, а именно: локальная скорость на расстоянии r от оси

$$w_r = w_0 \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right), \quad (II-4)$$

где w_0 — скорость на оси; R — радиус выходного сечения сопла.

На выходе из сопла скорость по периметру струи близка к нулю. Далее в результате исчезновения тормозящего действия стенок и наличия вязкости газа периферийный слой также приобретает поступательное движение и вовлекает в движение воздух (или другой газ) из окружающей среды. По мере увеличения движущейся массы и снижения скорости сечение струи непрерывно увеличивается и вся струя приобретает форму расширяющегося конуса. Непрерывное снижение скорости приводит к тому, что струя как бы затухает, теряясь в окружающей среде.

Одновременно с вовлечением в движение струи воздуха из окружающего пространства происходит молекулярная диффузия газа в воздух и воздуха в газ как в радиальном, так и в осевом направлениях. Внешние границы струи, образованные прямыми линиями, являются границами проникновения газа; внутренняя граница газового ядра является границей проникновения воздуха. Между этими поверхностями, близкими к коническим, движется смесь газа и воздуха с концентрацией, снижающейся от 100% до нуля. В объеме этой смеси можно отметить зону с содержанием газа более верхнего концентрационного предела воспламенения и зону с содержанием газа менее нижнего предела воспламенения. Между этими зонами смесь способна воспламеняться, состав ее плавно меняется от нижнего до верхнего пределов воспламенения. Особое значение имеет поверхность стехиометрической смеси, на которой количество воздуха соответствует теоретически необходимому.

Описанное распространение характерных зон в свободной затопленной ламинарной струе относится к случаю, когда струя не подвержена гравитационным или каким-либо другим силам. В противном случае, если рассматривать горящую струю, схема ее заметно искажается.

По мере увеличения скорости истечения газа ламинарный режим движения переходит в турбулентный. Вместо взаимопроникновения отдельных молекул происходит перенос элементарных объемов газа, вследствие чего процесс перемешивания существенно интенсифицируется. В турбулентном потоке мгновенные значения локальных скоростей непрерывно меняются. Это равнозначно тому, что на усредненную скорость поступательного движения накладываются направленные в разные стороны пульсационные скорости.

Между диффузионными явлениями, вызванными хаотическим тепловым движением молекул, и перемещением элементарных объемов газа (или жидкости) есть известное сходство. В первом

случае определяющими величинами являются средняя скорость движения молекул и длина их свободного пути. Во втором — средняя квадратическая величина пульсационной скорости и средняя длина пути смещения l' , который проходит элементарный объем жидкости по отношению к остальной жидкости, прежде чем он потеряет свою индивидуальность, т. е. утратит заметно отличную скорость и очертание. Длина этого пути называется масштабом турбулентности. Произведение средней квадратической пульсационной скорости на масштаб турбулентности

$$\varepsilon_0 = w'l'$$

называется коэффициентом турбулентного обмена.

Как установлено, в области значений $Re > 100\,000$

$$\varepsilon_0 = 1,1 \cdot 10^{-3} w_0 d, \quad (II-5)$$

где $\varepsilon_0 = w'l'$ — средний коэффициент турбулентного обмена; w' — средняя квадратическая пульсационная скорость; l' — масштаб турбулентности; w_0 — средняя скорость потока; d — диаметр трубы.

Для значений $10\,000 < Re < 100\,000$

$$\varepsilon_0 = 9 \cdot 10^{-3} w_0 d Re^{0,16}. \quad (II-6)$$

Интенсивность турбулентной диффузии неизмеримо выше, чем молекулярной, так как масштаб турбулентности в десятки и сотни тысяч раз больше длины пробега молекулы.

Как было указано, завершающим процессом перемешивания и при турбулентной диффузии все же является молекулярная диффузия. Действительно, перемещения элементарных объемов газа, включающих миллиарды молекул, не могут обеспечить равномерное смесеобразование на молекулярном уровне. Однако непосредственный контакт газов в исчезающе малых объемах приводит к огромному росту градиентов концентраций, вследствие чего заключительный процесс молекулярной диффузии протекает чрезвычайно быстро.

Наиболее полное исследование турбулентных струй, обобщающее работы других авторов, принадлежит Г. Н. Абрамовичу [1]. Турбулентная струя газа или жидкости, вытекающая в затопленное пространство, имеет следующую структуру. На некотором расстоянии от сопла на оси струи сохраняется начальная скорость, в то же время на периферийных участках струи скорость падает за счет вовлечения в поток окружающей среды. Отрезок струи, на котором скорость на оси остается равной скорости истечения из сопла, называют начальным участком струи. Длина этого участка равна примерно четырем-шести диаметрам сопла. В пределах начального участка по оси струи движется газ без примеси воздуха (рис. II-2).

После небольшого переходного участка начинается так называемый основной участок струи, представляющий собой в целом турбулентный пограничный слой. На этом участке во всех точках струи движется смесь газа с вовлеченным из окружающей среды воздухом. Скорость движения от максимальной на оси плавно падает до нуля на границах струи. Границы струи, близкие к прямойлинейным, образуют с осью угол около $12^\circ 30'$. Осевая скорость, как и скорости в любых точках струи, падает по мере удаления от сопла. На некотором расстоянии от начала она практически приближается к нулю и струя затухает.

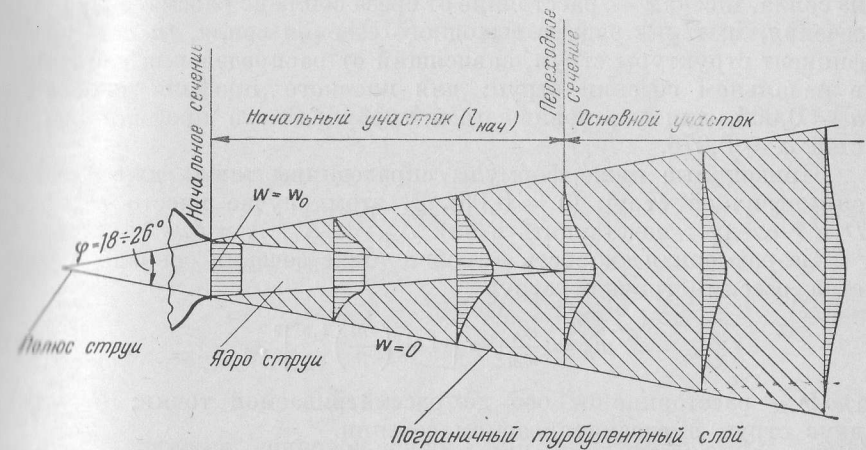


Рис. II-2. Схема свободной затопленной турбулентной струи.

Процесс смешения струи с внешней средой подобен неупругому удару тел. Поэтому в любом поперечном сечении свободной струи количество движения равно начальному количеству движения струи, вытекающей из сопла, т. е.

$$\int_0^G w dG = \int_0^F \rho w^2 dF = wG_0 = \text{const.}$$

Если вместо абсолютного значения скорости рассматривать ее отношение к скорости на оси, а вместо расстояния от оси струи — его отношение к какому-нибудь характерному размеру (например, к расстоянию от оси до точки, в которой скорость равна половине осевой, или к радиусу струи), то оказывается, что в сходственных точках любых двух сечений основного участка струи безразмерные скорости одинаковы. В отличие от ламинарной струи, размеры и характеристики которой меняются с изменением скорости истечения, турбулентная струя остается автомодельной в широком диапазоне начальных скоростей, т. е. угол ее раскрытия, длина

начального участка и безразмерные скорости сохраняют свое значение.

Осевую скорость в любом сечении основного участка осесимметричной струи можно вычислить по формуле, приводимой Г. Н. Абрамовичем [1],

$$\bar{w}_m = \frac{w_m}{w_0} = \frac{0,96}{ax/R_0 + 0,29}, \quad (\text{II-7})$$

где \bar{w}_m — безразмерная осевая скорость; w_m — осевая скорость в данном сечении, м/сек; w_0 — начальная скорость истечения из сопла, м/сек; x — расстояние от среза сопла до рассматриваемого сечения, м; R_0 — радиус выходного сечения сопла, м; a — коэффициент структуры струи, зависящий от распределения скоростей в начальном сечении струи; для плоского профиля скоростей $a = 0,066$, для установившегося турбулентного профиля скоростей $a = 0,076$.

Приводимые ниже формулы справедливы также для плоско-симметричной струи ($a = 0,06$). В этом случае вместо D_0 , R_0 , D и r следует подставлять в них Δ_0 , $1/2 \Delta_0$, Δ и δ .

Безразмерная скорость в любой точке сечения основного участка осесимметричной струи

$$\bar{w}_n = \frac{w_n}{w_m} = \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^{1,5} \right]^2, \quad (\text{II-8})$$

где r — расстояние от оси до рассматриваемой точки; R — радиус струи в рассматриваемом сечении.

Так как угол раскрытия струи приблизительно 25° , то радиус струи на расстоянии x от устья сопла

$$R \approx 0,22x. \quad (\text{II-9})$$

Следовательно,

$$\frac{w_n}{w_m} \approx \left[1 - 9,6 \left(\frac{r}{x} \right)^{1,5} \right]^2. \quad (\text{II-10})$$

По мере своего развития турбулентная струя вовлекает в движение воздух из окружающего пространства. Расход смеси в любом сечении струи

$$V_{см} = 2,22V_r \left(\frac{ax}{R_0} + 0,29 \right). \quad (\text{II-11})$$

Производная от V по x

$$\frac{dV}{dx} = 2,22a \frac{V_r}{R_0}, \quad (\text{II-12})$$

пропорциональна расходу газа V_r через сопло. Таким образом, на каждую единицу длины струи подсасывается из внешней среды одинаковое относительное количество газа

$$\Delta \bar{V} = 2,22a \frac{V_r \Delta x}{R_0}. \quad (\text{II-13})$$

Пользуясь этим свойством турбулентной газовой струи, можно легко определить, на каком расстоянии l от сопла струи горючего газа в среднем будут содержать количество воздуха αV_0 , необходимое для полного сгорания.

$$\frac{V_r + \alpha V_0 V_r}{V_r} = 1 + \alpha V_0 = 2,22 \left(\frac{2al}{D_0} + 0,29 \right), \quad (\text{II-14})$$

где D_0 — диаметр газового сопла.

$$l = (\alpha V_0 + 0,356) \frac{D_0}{4,44a}. \quad (\text{II-15})$$

Подставив в формулу (II-15) значение V_0 из выражения (I-44), получим

$$l = 0,252 \cdot 10^{-3} (\alpha Q_{p.н} + 318) \frac{D_0}{a}. \quad (\text{II-16})$$

Для круглой струи ($a = 0,076$)

$$l = 3,32 \cdot 10^{-3} D_0 (\alpha Q_{p.н} + 318) \quad (\text{II-17})$$

или (для природных газов)

$$l \approx 3,5 \cdot 10^{-3} \alpha Q_{p.н} D_{с.} \quad (\text{II-18})$$

Для плоской струи ($a = 0,06$)

$$l = 2,1 \cdot 10^{-3} \delta_0 (\alpha Q_{p.н} + 318), \quad (\text{II-19})$$

где δ_0 — ширина сопловой щели, или (для природных газов)

$$l \approx 2,2 \cdot 10^{-3} \delta_0 \alpha Q_{p.н}. \quad (\text{II-20})$$

Диаметр струи на расстоянии l от сопла (при $\varphi = 25^\circ$)

$$D = D_0 + 2l \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \approx D_0 + 0,426l. \quad (\text{II-21})$$

Подставив значение l из выражения (II-16), получим

$$D = D_0 + 0,107 \cdot 10^{-3} (\alpha Q_{p.н} + 318) \frac{D_0}{a} = \left(1 + \frac{0,107 \alpha Q_{p.н} + 318}{1000a} \right) D_0. \quad (\text{II-22})$$

Для круглой струи

$$D = (1,45 + 1,41 \cdot 10^{-3} \alpha Q_{p.н}) D_0; \quad (\text{II-23})$$

для плоской струи

$$\delta = (1,57 + 1,78 \cdot 10^{-3} \alpha Q_{p.н}) \delta_0. \quad (\text{II-24})$$

В случае, если струя развивается в спутном потоке воздуха, границы ее становятся криволинейными, средний угол раскрытия струи уменьшается с ростом относительной скорости спутного

потока $m = w_B/w_r$ (рис. II-3). Скорость на оси оказывается при этом выше, чем для струи, вытекающей в неподвижную среду. На рис. II-4 показано изменение безразмерной избыточной скорости $\Delta \bar{w}_m$ в зависимости от расстояния сечения от начала струи.

$$\Delta \bar{w}_m = \frac{\Delta w_m}{\Delta w_0} = \frac{w_m - w_B}{w_0 - w_B}, \quad (\text{II-25})$$

где w_m — скорость на оси струи в рассматриваемом сечении; w_0 — начальная скорость струи; w_B — скорость спутного потока воздуха.

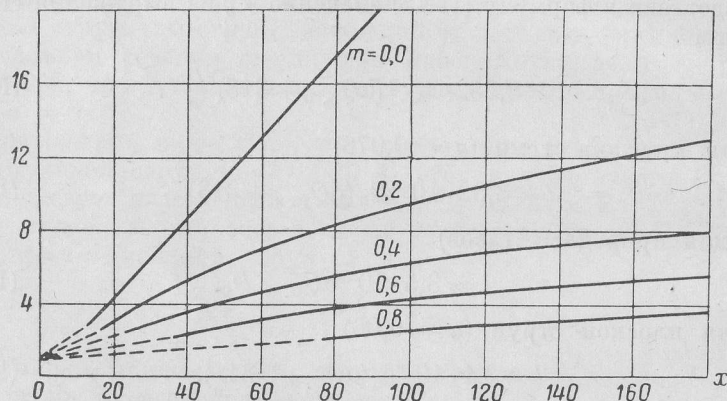


Рис. II-3. Границы осесимметричной струи в спутном потоке.

Изменение концентрации газа в струе (поперечное сечение) монотонно меняется от максимальной на оси струи до нуля на ее границе. Это изменение подчиняется зависимости

$$\frac{C}{C_m} = \sqrt{\frac{\Delta w}{\Delta w_m}} = 1 - \left(\frac{r}{R}\right)^{1,5}, \quad (\text{II-26})$$

где C — концентрация газа на расстоянии r от оси; C_m — концентрация на оси струи.

Концентрация на оси струи может быть определена по формуле, аналогичной формуле скорости (II-7):

$$\frac{C_m}{C_0} = \frac{0,70}{ax/R_0 + 0,29}. \quad (\text{II-27})$$

Тем же закономерностям, что и изменение концентрации, подчиняется изменение избыточной температуры в неизотермической струе, ибо если плотность вытекающего газа заметно отличается от плотности окружающей среды (воздуха), расчет такой изотермической струи может быть сведен к расчету неизотермической струи. Другими словами, реальный вытекающий

газ может быть заменен воздухом с температурой, при которой его плотность будет равна плотности газа.

Рассмотрение турбулентной затопленной газовой струи позволяет установить (как и в ламинарной струе):

- в пределах начального участка ядро вытекающего с начальной скоростью газа;
- область смеси с избыточным (против стехиометрического) содержанием газа;
- поверхность, соответствующую стехиометрическому соотношению газа и воздуха;
- область с избыточным содержанием воздуха.

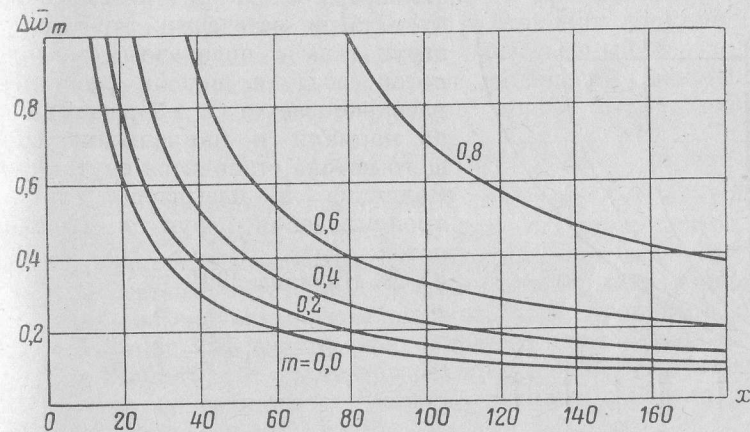


Рис. II-4. Изменение безразмерной осевой скорости в осесимметричной струе.

Однако при наличии внешнего сходства турбулентная струя имеет существенные отличия: геометрия ламинарной струи изменяется в зависимости от скорости истечения газа, размеры же турбулентной струи в широких пределах скоростей остаются постоянными. Наоборот, границы характерных зон в ламинарной струе при установившейся скорости оказываются стабильными, а в отношении турбулентной струи можно говорить лишь об устойчивости средних по времени границ, мгновенные значения скоростей и концентраций непрерывно меняются.

Газовые струи в поперечном потоке

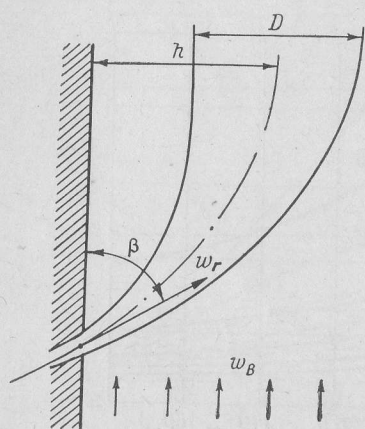
Явления, возникающие при истечении газовых струй в сносимый поток, довольно сложны и далеко еще не вполне изучены. Установлено, что перед газовой струей в поперечном сносимом потоке и в лобовой части самой струи имеется зона повышенного статического давления, а в кормовой части струи и за струей —

зона разрежения. Разница давлений перед и за струей является физической причиной искривления ее траектории.

Форма поперечного сечения струи (первоначально круглая) по мере удаления от соплового отверстия под действием сносящего потока воздуха деформируется и становится подковообразной. Это объясняется тем, что периферийные слои струи, имеющие малую скорость и интенсивно сдуваемые воздухом, обладают большей кривизной траектории, чем основная масса струи.

В результате процесс перемешивания газа с воздухом в газовой струе, обдуваемой поперечным потоком воздуха, происходит значительно интенсивнее, чем в струе, вытекающей в неподвижную

атмосферу или в спутный поток воздуха. При истечении турбулентной струи газа в поперечный сносящий поток воздуха первая постепенно разворачивается и на расстоянии h по нормали к направлению сносящего потока становится спутной ему. Величина h называется глубиной проникновения струи в сносящий поток (рис. II-5). По формуле Ю. В. Иванова [39]



$$h = k k_{\beta} d \frac{w_r}{w_b} \sqrt{\frac{\rho_r}{\rho_b}}, \quad (\text{II-28})$$

Рис. II-5. Схема газовой струи в сносящем потоке воздуха.

где k — коэффициент, зависящий от относительного шага между струями; k_{β} — коэффициент, зависящий от

угла β между направлением газовой струи и направлением потока воздуха.

Без большой ошибки можно принять $k_{\beta} = \sin \beta$. При относительном шаге s/d , равном 4, 8, 16, ∞ , значения k соответственно будут 1,6; 1,7; 1,9; 2,2.

В случае истечения газовых струй в поток под углом 90°

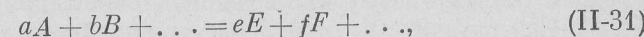
$$h = kd \frac{w_r}{w_b} \sqrt{\frac{\rho_r}{\rho_b}}. \quad (\text{II-29})$$

Максимальную дальность (глубину проникновения) при прочих равных условиях имеет одиночная струя, а дальность ряда струй падает с уменьшением шага. Глубина проникновения струи h определяется по положению оси струи, развернувшейся по направлению сносящего потока. Опытами И. И. Чернобыльского и Г. М. Щеголева [84] было установлено, что в месте полного разворота газовой струи по потоку воздуха диаметр ее

$$D \approx 0,75h. \quad (\text{II-30})$$

Реакции окисления, т. е. горения компонентов газового топлива, протекают в том или ином объеме. Как топливо, так и воздух, необходимый для горения, находятся в одинаковом агрегатном состоянии. Такие реакции носят название гомогенных. В отличие от них реакции горения твердого или жидкого топлив характеризуются различными агрегатными состояниями горючего и окислителя и протекают на поверхности раздела фаз или близ них. Такие реакции носят название гетерогенных.

Рассмотрим основные закономерности протекания гомогенных реакций. В общем виде уравнения протекания реакций (стехиометрические уравнения), определяющие качественный переход исходных веществ в конечные, являются выражением закона сохранения вещества. Общий вид реакции может быть записан так:



где A и B — исходные компоненты реакции; E и F — конечные компоненты; a, b, e, f — число молей этих компонентов.

Очевидно, что концентрация исходных компонентов в реагирующей системе с течением времени непрерывно уменьшается, а содержание конечных компонентов, т. е. продуктов реакции, увеличивается. Изменение концентрации какого-либо из реагирующих веществ или продуктов реакции в единицу времени является скоростью реакции w . Скорость реакции в рассматриваемый момент

$$w_A = - \frac{dC_A}{d\tau}, \quad (\text{II-32})$$

а средняя скорость реакции за конечный отрезок времени

$$\bar{w}_A = - \frac{\Delta C_A}{\Delta \tau}. \quad (\text{II-33})$$

Знак минус показывает, что концентрации исходных компонентов по ходу реакции уменьшаются. Выражения скоростей для конечных компонентов не будут отрицательными, так как их концентрация увеличивается.

Скорости реакции различных компонентов различны, но находятся в постоянных эквивалентных соотношениях, т. е.

$$w_A/w_E = a/e. \quad (\text{II-34})$$

Скорость реакции зависит от концентраций и для реакции $A + B = E + F$ имеет вид

$$w = - \frac{dC}{d\tau} = kC_A C_B, \quad (\text{II-35})$$

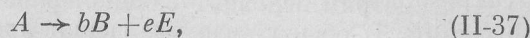
где k — константа скорости реакции.

Это уравнение представляет собой выражение закона действующих масс, который устанавливает, что скорость реакции в гомогенной системе в каждый момент времени пропорциональна произведению концентраций реагирующих веществ.

Для реакций, в которых число реагирующих молей различно (II-31), скорость реакции

$$w = -\frac{dC}{d\tau} = kC_A^a C_B^b. \quad (\text{II-36})$$

В том случае, когда в реакции принимает участие лишь одна молекула исходного вещества, т. е.



реакция называется мономолекулярной.

Полагаем, что реакция необратима, т. е. протекает до полного израсходования исходного вещества. Тогда по закону действующих масс

$$w = -\frac{dC}{d\tau} = kC \quad (\text{II-38})$$

и

$$\frac{dC}{C} = -k d\tau. \quad (\text{II-39})$$

При постоянной температуре ($T = \text{const}$) постоянна и константа скорости реакции $k = \text{const}$. Интегрирование уравнения (II-39) в пределах от C_0 до C дает

$$\int_{C_0}^C \frac{dC}{C} = -k \int_0^{\tau} d\tau, \quad (\text{II-40})$$

откуда

$$C = C_0 \exp(-k\tau).$$

Подставляя значение C из (II-40) в (II-38), получаем

$$w = -\frac{dC}{d\tau} = kC_0 \exp(-k\tau), \quad (\text{II-41})$$

где C_0 — начальная концентрация вещества.

В простейшем случае полимолекулярной реакции, когда константы скорости реакций равны, а реагирующие вещества содержатся в смеси в одинаковых концентрациях C , изменение концентраций в ходе реакции одинаково. Ход такой реакции будет подчиняться зависимости

$$\frac{dC}{d\tau} = -kC^n, \quad (\text{II-42})$$

или

$$\frac{dC}{C^n} = -k d\tau. \quad (\text{II-43})$$

Проинтегрируем это выражение в пределах времени от 0 до τ и в пределах концентраций, соответственно, от $C_0 = 1$ до C (при $T = \text{const}$ и $k = \text{const}$):

$$\int_1^C \frac{dC}{C^n} = -k \int_0^{\tau} d\tau,$$

откуда

$$\tau = \frac{1}{k(n-1)} \left(\frac{1}{C^{n-1}} - 1 \right). \quad (\text{II-44})$$

Формула (II-44) показывает, что чем выше порядок реакции (т. е. число атомов, участвующих в элементарном акте реакции), тем медленнее она протекает. Кроме того, как было указано, даже в случае необратимой реакции для полного завершения реакции (т. е. $C = 0$) требуется бесконечно большое время. Однако так как уменьшение концентрации реагирующего вещества подчиняется экспоненциальному закону по формуле (II-40), то уже в первые моменты реакции происходит очень быстрое снижение концентрации.

Константа скорости реакции k очень сильно зависит от температуры. Эта зависимость описывается уравнением Аррениуса:

$$k = k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right). \quad (\text{II-45})$$

В общем случае скорость реакции

$$w = k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) f(C), \quad (\text{II-46})$$

где k_0 — постоянная (предэкспоненциальный множитель); E — энергия активации; R — универсальная газовая постоянная; T — абсолютная температура, °К; $f(C)$ — некоторая функция концентрации реагирующего вещества, находящегося в недостатке против стехиометрического.

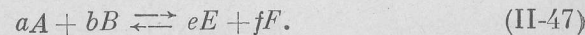
Энергия активации E представляет собой величину энергии, необходимой для разрушения внутримолекулярных связей реагирующего вещества. Величина ее зависит от характера реакции. Наименьшее значение энергии активации соответствует реакциям, протекающим с участием свободных атомов, так как в этих случаях нет затраты энергии на разрушение внутримолекулярных связей. Для большинства горючих газов энергия активации составляет 20 000 — 30 000 ккал/кмоль.

Множитель $\exp\left(-\frac{E}{RT}\right) = e^{-E/RT}$ представляет собой с точки зрения статистической физики отношение числа столкновений молекул, приводящих к реакции, к общему числу столкновений. Естественно, что величина этого множителя возрастает с увеличением температуры. Например, с увеличением температуры от 500 до 1000 °К скорость реакции горения большинства газов возрастает в зависимости от величины энергии активации в $2 \cdot 10^4$ — $5 \cdot 10^8$ раз.

Обратимые реакции и химическое равновесие

Судя по уравнению (II-31), реакция имеет одностороннюю направленность, т. е. исходные реагенты превращаются в конечные продукты реакции. В действительности все химические реакции в той или иной степени обратимы, т. е. могут протекать как от левой части уравнения (II-31) к правой, так и наоборот, в сторону образования исходных продуктов. В зависимости от условий протекания реакции (температуры и давления) то или иное направление может значительно преобладать, т. е. скорость прямой реакции во много раз превосходит скорость обратной. Такая картина наблюдается при сгорании топлива в диапазонах температур, характерных для большинства теплотехнических агрегатов (до 1500—2000 °С), и при давлениях, близких к атмосферному. В указанных условиях реакции горения практически необратимы и завершаются почти полным окислением горючих элементов.

Если скорость обратной реакции соизмерима со скоростью прямой, то реакция является химически обратимой и в результате ее обязательно наряду с конечными продуктами реакции будут и исходные. Учитывая сказанное, более правильно записывать уравнение реакции в общем виде так:



Скорости прямой и обратной реакций

$$w_1 = k_1 C_A^a C_B^b \quad (\text{II-48})$$

и

$$w_2 = k_2 C_E^e C_F^f. \quad (\text{II-49})$$

По мере течения реакций возрастает концентрация конечных продуктов и уменьшается концентрация исходных. Результирующая скорость $w = w_1 - w_2$ в конечном итоге снизится до нуля, так как скорости прямой и обратной реакций окажутся одинаковыми. Наступит так называемое химическое равновесие, хотя в системе будут протекать взаимно компенсирующие друг друга прямая и обратная реакции.

Из условия равенства скоростей прямой и обратной реакций

$$w_1 = w_2,$$

или

$$k_1 C_A^a C_B^b = k_2 C_E^e C_F^f, \quad (\text{II-50})$$

откуда

$$\frac{C_A^a C_B^b}{C_E^e C_F^f} = \frac{k_2}{k_1} = k_C, \quad (\text{II-51})$$

где k_C — константа равновесия данной реакции.

Константа равновесия может быть также выражена через парциальные давления компонентов реакции:

$$k_C = \frac{P_A^a P_B^b}{P_E^e P_F^f}. \quad (\text{II-52})$$

Связь между константами k_C и k_p выражается зависимостью

$$k_C = k_p (RT)^{\Delta n}, \quad (\text{II-53})$$

где R — универсальная газовая постоянная; T — абсолютная температура; Δn — разность между числом молей в левой и правой частях уравнения реакции.

Константа равновесия k_p однозначно зависит от температуры, при которой протекает реакция, и связана с ней уравнением закона Вант-Гоффа:

$$\frac{d \ln k_p}{dT} = \frac{q_p}{RT^2}, \quad (\text{II-54})$$

где q_p — тепловой эффект реакции.

В интегральной форме в пределах от T_1 до T_2 это уравнение может быть записано в виде

$$\ln \frac{k_2}{k_1} = \frac{q_p}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right). \quad (\text{II-55})$$

Очевидно, что для экзотермических реакций с ростом температуры константа равновесия увеличивается. Для эндотермических реакций наблюдается обратная картина.

Реакции горения в случае протекания их при температурах, не превышающих 1500—1600 °С, можно считать практически необратимыми. Однако при более высоких температурах, характерных для некоторых промышленных печей (мартеновских, стекловаренных и др.), приходится учитывать обратимость реакций, приводящую к тому, что наряду с конечными продуктами полного окисления (CO_2 , H_2O) в продуктах сгорания будут CO , H_2 , атомарные кислород и водород и гидроксильные радикалы.

На рис. II-6 приведены кривые диссоциации трехатомных продуктов сгорания в зависимости от температуры. Видно, что при температурах выше 1500 °С в продуктах сгорания начинается заметный рост содержания CO и H_2 . Это необходимо учитывать при расчетах горения. Особенно резкий рост продуктов диссоциации наблюдается при температурах выше 2500 °С, что совершенно нарушает сложившиеся представления о горении.

Теоретическое вычисление констант равновесия хотя и возможно, но не дает достаточно точных результатов. Поэтому их определяют опытным путем с помощью спектроскопических исследований.

В реакциях, протекающих с изменением объема, на состав равновесной смеси кроме температуры влияет еще и величина давления. Зная температуру, давление и значение константы равновесия, можно определить состав равновесной смеси.

При изменении условий протекания реакции, т. е. температуры или давления, происходит смещение равновесия в сторону реакции, стремящейся ослабить произведенное изменение (принцип Ле Шателье). Например, если повысить давление при протекании обратимой реакции в замкнутом объеме при постоянной температуре, то повысится скорость той реакции, при которой будет уменьшаться число молей конечного продукта, что вызовет снижение давления. Этим объясняется, например, изменение равновесного состава генераторного газа в сторону увеличения в нем

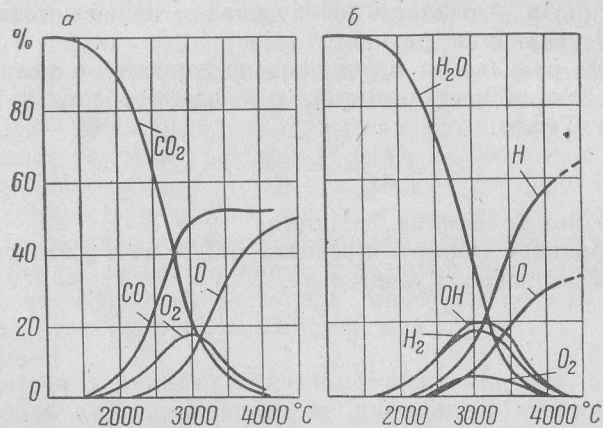


Рис. 11-6. Кривые диссоциации трехатомных продуктов сгорания.
а — двуокись углерода; б — водяной пар.

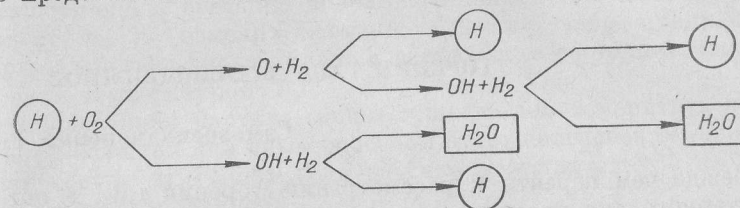
более тяжелых компонентов при повышении давления. В тех случаях, когда в результате реакции число молекул газов не меняется, изменение давления не нарушает равновесия.

Как было указано, химические реакции, в частности реакция горения, идут по особым закономерностям, отличающимся от закономерностей химической кинетики. Причиной этого является цепной характер реакций горения. Молекулярные стехиометрические уравнения совершенно не отражают этого процесса, а показывают лишь исходные реагирующие вещества и конечные продукты, связывая их условиями материального баланса.

Согласно воззрениям Н. Н. Семенова и его школы, а также ряда других отечественных и зарубежных ученых, превращение исходных веществ в конечные продукты происходит не сразу, а с образованием промежуточных продуктов, содержащих химически активные частицы в виде атомов водорода, кислорода, гидроксильных радикалов и ряда других неустойчивых соединений. Промежуточные продукты легко вступают в дальнейшие реакции, в результате которых образуются как конечные продукты, так и новые активные центры. Таким образом, возникает непрерывная цепь превра-

щений, в каждом звене которой образуется определенное количество продукта.

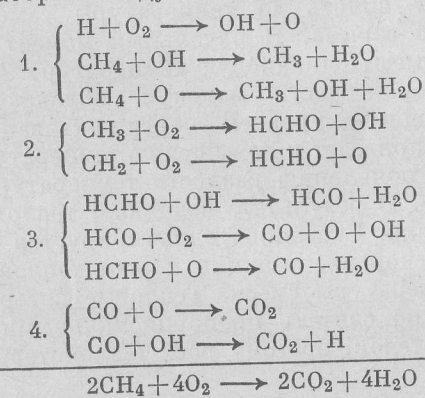
Примером цепной реакции может служить образование молекул водяного пара, т. е. реакция горения водорода. Совокупность сложных реакций взаимодействия водорода и кислорода может быть представлена следующей схемой:



Из схемы видно, что взаимодействие одного атома водорода, появившегося в результате разрушения молекул, с молекулой кислорода приводит в итоге к образованию двух молекул воды и трех новых атомов водорода. Образовавшиеся активные центры (атомы водорода) могут погибнуть, и тогда цепь обрывается, т. е. реакция затухает; в противном случае аналогичная цепь превращений продолжается. Рассмотренная реакция будет разветвленной, если все три или хотя бы два атома водорода дадут начало новым цепям. В случае, если в каждом звене новая серия превращений возбуждается лишь одним активным центром, реакция оказывается неразветвленной. Очевидно, что скорость цепной реакции будет определяться скоростью наиболее медленной реакции, являющейся звеном цепи. Первоначальное возникновение активных центров может произойти в результате столкновений неактивной молекулы с молекулой, имеющей высокую энергию.

Горение окиси углерода и углеводородов имеет более сложный цепной процесс, в котором участвуют атомарный водород, гидроксильные радикалы и другие активные центры [65].

Приближенная схема стадийного горения метана может быть представлена набором следующих реакций:



В действительности реакции протекают сложнее и могут сопровождаться выделением элементарного углерода в результате термического разложения углеводов. Следует заметить, что современная теория цепных реакций используется для описания промежуточных реакций основные зависимости классической кинетики.

§ II-4.

ГОРЕНИЕ ГАЗА В НЕПОДВИЖНОЙ СРЕДЕ

Самовоспламенение смеси

Прежде чем перейти к рассмотрению горения газа в потоке, характерного для промышленных установок, познакомимся с некоторыми особенностями реакций, протекающих в неподвижной газовой смеси в условиях постоянного давления.

Как было указано, даже при низких температурах в газовой смеси имеются молекулы, энергия которых достаточна для вступления в реакцию. Так как реакция горения является экзотермической, то в случае полного отсутствия отвода тепла от газовой смеси (т. е. для адиабатной системы) будет происходить непрерывное, хотя и очень медленное вначале, повышение температуры. Это, в конечном итоге, должно привести к самоускорению реакции, переходящей в тепловой взрыв, т. е. почти мгновенное вовлечение в реакцию всей массы газа. В обычных условиях такое явление не наблюдается из-за неизбежных тепловых потерь через стенки сосуда.

Если повышать температуру стенок сосуда, в котором заключена газоздушная смесь, то тепловые потери будут уменьшаться и при известном значении этой температуры тепловыделение будет превышать потери, начнется самоускорение реакции и произойдет воспламенение смеси, т. е. тепловой взрыв.

Рассмотрим условия, при которых газоздушная смесь, находящаяся в сосуде с теплопроводными стенками, будет повышать свою температуру вплоть до температуры самовоспламенения, т. е. до теплового взрыва. В начальный момент как смесь, так и стенки сосуда имеют одинаковую температуру T_0 . В результате окисления некоторой части молекул, обладающих в момент соударения необходимым уровнем энергии активации, будет выделяться тепло, что приведет к повышению температуры смеси, ускорению реакции и появлению разности температур между смесью и стенками сосуда. В результате возникает тепловой поток через ограждающие стенки. Сказанное иллюстрируется рис. II-7. Кривая 1 отражает ускорение реакции и рост тепловыделения в зависимости от температуры смеси. Тепловые потери через стенки приблизительно можно считать пропорциональными разности температур смеси и стенок, поэтому рост теплопотерь будет изображаться прямой 2.

В том случае, когда линия теплоотдачи 2 пересекает кривую тепловыделения (точка a на рис. II-7), при температуре T_p наступит равновесие, количество выделяющегося в результате реакции тепла будет полностью расходоваться на покрытие теплопотерь и дальнейшего развития реакция не получит. В этом случае даже небольшие дополнительные тепловые воздействия (например, кратковременное внесение дополнительного тепла в систему или отвод тепла) не изменят картины. Система после прекращения этого воздействия снова придет в равновесное состояние, характеризуемое температурой T_p .

Изображенная картина может существенно измениться в двух случаях: если тем или иным способом будет повышена температура стенок сосуда до T'_c или если за счет дополнительной изоляции будут снижены теплопотери в окружающую среду. Следует заметить, что это также неизбежно приведет к повышению температуры стенок.

В первом случае, принимая прежнее значение коэффициента теплоотдачи a , мы получим линию $2'$, характеризующую отвод тепла. Во втором случае линия теплоотдачи $2''$ пойдет более полого. Касания указанных линий с кривой тепловыделения соответственно в точках b и c будут указывать на неустойчивые тепловые состояния системы, соответствующие температурам T'_p и T''_p . В этих случаях изменения количества выделяемого или отводимого тепла нарушат равновесие. Малейшее превышение тепловыделения над теплоотводом приведет к самоускорению реакции и тепловому взрыву. Обратное явление приведет систему в устойчивое состояние. Температуры T'_p , T''_p для данной системы будут температурами самовоспламенения смеси.

Таким образом, очевидно, что температура самовоспламенения не является константой и зависит не только от теплофизических свойств газоздушной смеси, но и от условий теплообмена между смесью и стенками сосуда, в том числе от его размеров и формы. Не следует также забывать, что материал стенок может влиять на скорость реакции окисления. Ряд веществ повышает скорость реакции, т. е. понижает температуру самовоспламенения (катализаторы), другие же вещества замедляют реакцию и повышают температуру самовоспламенения (ингибиторы).

В приводимых разными авторами численных значениях температуры самовоспламенения наблюдаются заметные расхождения,

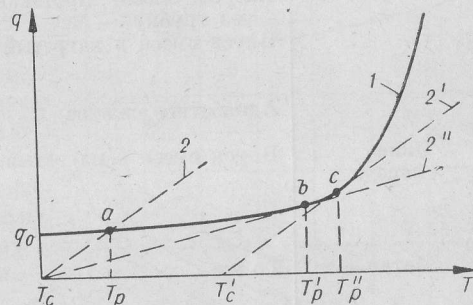


Рис. II-7. Кривые тепловыделения и теплопотерь при окислении газоздушной смеси.

объясняемые различными методами и условиями проведения эксперимента (табл. II-2). На рис. II-8 показана температура самовоспламенения углеводородов в зависимости от состава смеси (впуск в горячий сосуд).

ТАБЛИЦА II-2
Температуры самовоспламенения газов в зависимости от метода измерения

Газ	Метод измерения	Содержание газа в газоз-душн-ой смеси, %	Температура самовос-пламе-нения, °С
Водород	Нагрев смеси, протекающей че-рез трубку	28,50	609
		Впуск смеси в нагретый сосуд	28,50
	Адиабатное сжатие	28,50	590 ¹
		28,50	625 ²
		28,50	571
Окись углерода	Впуск смеси в нагретый сосуд	23,55	656 ³
		23,55	630 ⁴
		61,90	672 ³
		61,90	641 ⁴
Метан	То же	2,00	850
		4,00	840
		8,00	800
Этан	»	1,90	594
		8,15	540
Пропан	»	1,25	588
		4,90	525
Ацетилен	»	10,00	500
		45,0—55,0	335
Сероводород	»	1,00	373
		12,00	290
		60,00	487

¹ Объем сосуда 350 см³.

² Объем сосуда 9 см³.

³ Сухая смесь.

⁴ В составе смеси 3,2% Н₂О.

Температура самовоспламенения сравнительно просто может быть определена экспериментально. Самыми распространенными методами являются:

1) выпуск холодной смеси заданного состава в эвакуированный нагретый сосуд (значение температуры самовоспламенения принимается равным температуре стенок сосуда, при которой происходит воспламенение впускаемой смеси);

2) раздельное нагревание газа и воздуха до одинаковой температуры с последующим смешением их на выходе из концентрических трубок (температура, соответствующая воспламенению смешивающихся потоков, будет искомой);

3) быстрое (близкое к адиабатному) сжатие подготовленной смеси, приводящее к самовоспламенению (известные термодинамические соотношения позволяют определить нужную температуру самовоспламенения).

Мы рассмотрели условия самовоспламенения газоз-душн-ой смеси при повышении температуры ограждающих стенок и уменьшении тепловых потерь. Такой процесс при определенной температуре приводит к интенсивному развитию реакции независимо от содержания горючего газа в смеси. Очевидно, что в результате теплового взрыва будет практически почти полностью израсходован горючий газ или кислород (в зависимости от недостатка того или другого по сравнению со стехиометрическим количеством).

Реакция горения может начаться в очень ограниченном объеме под влиянием местного нагрева смеси при помощи электрической искры, калильной спирали, раскаленного твердого тела или устойчивого микрофакела. В этом случае горение может при известных условиях распространиться также на весь объем, но уже не в форме теплового взрыва, а за счет перемещения фронта пламени, возникшего у источника зажигания. Перемещение фронта пламени и вовлечение в реакцию всего газа, заключенного в сосуде, может быть относительно медленным (десятки сантиметров или метры в секунду) в случае так называемого теплового режима горения или очень быстрым (сотни и тысячи метров в секунду) в случае детонационного горения.

Тепловой режим горения обусловлен нагревом смеси перед фронтом пламени за счет теплопроводности, а также проникновением в предфронтную зону активных центров реакции за счет молекулярной (в некоторых случаях турбулентной) диффузии. Детонационный режим горения возникает за счет появления волны сжатия, движущейся перед фронтом пламени. Скорость распространения детонационной волны и перемещающегося с ней фронта пламени может достигать 2000—2500 м/сек,

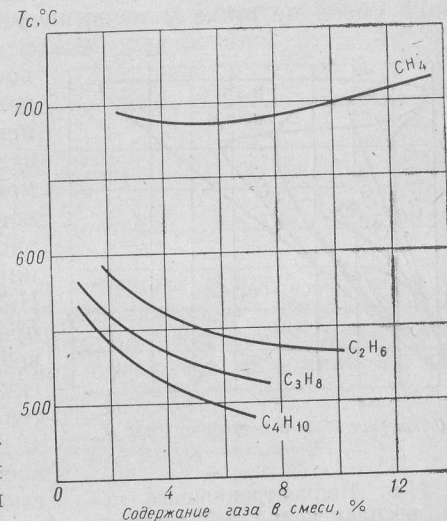


Рис. II-8. Зависимость температуры самовоспламенения T_c от состава смеси.

а давление в зоне волны быть в 30—50 раз больше начального.

Детонационное горение, приводящее к местным ударным повышением давления, может возникать как в закрытых сосудах, так и в трубках, в зонах, удаленных от открытого конца.

Концентрационные пределы воспламенения

В отличие от теплового взрыва сгорание всей смеси от местного зажигания возможно только тогда, когда содержание горючего газа в смеси не ниже и не выше определенного, т. е. находится в концентрационных пределах воспламенения. Вне этих пределов горение или взрыв смеси невозможны. В этом случае при зажигании от раскаленного тела может наблюдаться лишь местное горение непосредственно около запала, не распространяющееся на весь объем смеси. Наличие концентрационных пределов воспламенения газозвдушных смесей является логическим следствием процесса теплового зажигания.

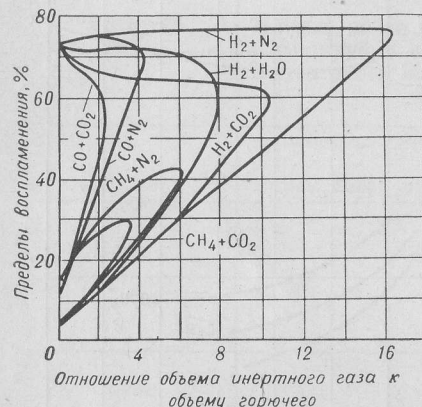


Рис. II-9. Концентрационные пределы воспламенения забалластированных газозвдушных смесей.

С повышением температуры эти границы расширяются, и при достижении температуры самовоспламенения молекулы горючего газа вступают в реакцию с кислородом независимо от состава смеси. Этим объясняется, что начавшийся процесс горения при достаточном количестве кислорода приводит к практически полному выгоранию горючего газа. В случае нехватки кислорода реакция будет протекать до полного его использования.

В главе I приведены формулы для определения пределов воспламенения смесей горючих газов с воздухом — (I-16) и забалластированных смесей — (I-17). Нижний предел воспламенения горючей смеси может быть определен аналитически в зависимости от теплоты сгорания горючей части газа по формуле (I-18).

На рис. II-9 приведены кривые концентрационных пределов воспламенения забалластированных газозвдушных смесей. Пересечения кривых, соответствующих различным газам, с осью ординат дают нижний и верхний пределы воспламенения для чистых газозвдушных смесей, т. е. смесей, не забалластированных инертными газами. Балласт повышает нижний предел воспламенения

у всех газов почти пропорционально объемной доле балласта, тогда как верхний предел у различных газов изменяется как в сторону понижения ($\text{CO} + \text{CO}_2$, $\text{H} + \text{CO}_2$), так и в сторону повышения ($\text{CH}_4 + \text{CO}_2$, $\text{CH}_4 + \text{N}_2$). Так же, как на температуру самовоспламенения, на концентрационные пределы воспламенения влияют катализаторы и ингибиторы, с которыми контактирует смесь.

В теплотехнических расчетах и анализах газозвдушных смесей более показательной величиной, чем относительное содержание горючего газа в смеси, является коэффициент избытка воздуха. Связь между концентрационными пределами воспламенения N , %, и коэффициентами избытка воздуха следующая:

$$N = \frac{100}{1 + \alpha V_0}; \quad (\text{II-56})$$

$$\alpha = \frac{100 - N}{NV_0}; \quad (\text{II-57})$$

где V_0 — теоретически необходимое для сгорания количество воздуха, $\text{м}^3/\text{м}^3$.

Для различных природных и попутных газов с теплотой сгорания от 6000 до 15 000 ккал/ м^3 максимальная величина коэффициента избытка воздуха, при которой возможно зажигание холодной ($t \leq 50^\circ\text{C}$) газозвдушной смеси, почти одинакова. Действительно, по формуле (I-45)

$$V_0 = 1,01 \cdot 10^{-3} Q_{в.г.}$$

а из формулы (I-18)

$$N_{\min} = 49\,000 / Q_{в.г.} \quad (\text{II-58})$$

Подставив эти значения в формулу (II-57), получим

$$\alpha_{\max} \approx \frac{100}{N_{\min} V_0} - \frac{1}{V_0} = 2,01 - 990 / Q_{в.г.} \quad (\text{II-59})$$

При изменении $Q_{в.г.}$ от 6000 до 15 000 ккал/ м^3 второй член формулы (II-59) меняется от 0,16 до 0,06 (округленно). Следовательно, $\alpha_{\max} = 1,85 \div 1,95$. В среднем (с погрешностью до 3%), $\alpha_{\max} = 1,90$.

Нормальная скорость распространения пламени

Рассмотрим процесс распространения пламени в смеси, содержащей горючий газ в концентрации, обеспечивающей горение при запале от какого-либо постороннего источника. Представляет интерес случай, когда эта смесь движется по трубке диаметром D с теплопроводными стенками. В результате начавшегося горения создается фронт пламени, имеющий толщину δ и перемещающийся в направлении свежей смеси. Стабилизация фронта

пламени будет иметь место при равенстве скоростей смеси и противоположно направленной скорости перемещения фронта пламени.

В случае, когда рассмотренное явление происходит в трубке с теплопроводными стенками, температура процесса будет определяться соотношением между тепловыделением в результате реакции и теплопотерями через стенки трубки. Очевидно, что количество выделяющегося в зоне реакции тепла будет пропорционально скорости поступающей в эту зону смеси (как указано ранее, равной скорости перемещения фронта пламени) и площади поперечного сечения трубки, т. е. квадрату диаметра. Тепловые потери будут пропорциональны толщине фронта пламени (т. е. зоны реакции) и диаметру трубки. Увеличение диаметра трубки будет приводить к уменьшению доли теряемого из зоны реакции тепла и увеличению скорости распространения пламени. Скорость равномерного распространения пламени монотонно возрастает все медленнее по мере увеличения диаметра трубки и снижения доли теплопотерь, стремясь к некоторой величине, определяемой физико-химическими свойствами смеси.

Как было указано, скорость перемещения элемента фронта пламени по нормали к этому элементу называется *нормальной скоростью распространения пламени, или нормальной скоростью горения, u_n* . Она зависит от свойств газа, содержания его в горючей смеси (т. е. коэффициента избытка воздуха, температуры и давления смеси).

По мере уменьшения диаметра трубки с теплопроводными стенками доля теряемого из зоны реакции тепла возрастает, что приводит к снижению нормальной скорости распространения пламени. Это, в свою очередь, приводит к снижению тепловыделения в зоне реакции и, в конечном итоге, прекращению реакции, т. е. погасанию пламени.

Для всякой горючей смеси имеется так называемый критический диаметр канала, отверстия или ширина щели, в которых горение невозможно; проскок пламени через эти отверстия не возможен ни при каких скоростях смеси. Это явление было отмечено еще в 1815 г. Г. Дэви и реализовано в конструкции безопасной рудничной лампы, носящей его имя. Установлено, что для стехиометрической смеси водорода с воздухом $D_{кр} \approx 0,9$ мм, а для метановоздушной смеси — 3,5 мм.

Хотя описанных представлений о механизме горения смеси в каналах малого диаметра придерживается большинство авторов, по-видимому это явление более сложное, так как эксперименты показывают, что критические диаметры отверстий практически не зависят от материала и толщины ограничивающих стенок, т. е. от их теплопроводности. Кроме того, свойствами не пропускающей пламя и не обеспечивающей горение обладают не только отдельные каналы, щели или отверстия, но и сетки, ячейки или ряд щелей, отделенных тонкими перегородками. Весьма вероятно, что

помимо теплоотвода характер цепных реакций меняет наличие близко расположенных стенок, приводящих к развитию и завершению процесса горения.

Существуют многочисленные опытные данные относительно скоростей нормального горения и проскоков пламени в трубках с диаметрами выше критического, в частности для трубок диаметром 25 мм. Предложен ряд формул для пересчета скоростей проскока на другие условия, т. е. диаметры и характеристики газозвушнх смесей [111].

При постановке эксперимента обнаруживается расхождение теоретической и опытной кривых зависимости скорости распространения пламени от диаметра трубки (рис. II-10). Увеличение скорости объясняется возникновением турбулентности и искривлением фронта пламени при увеличении диаметра трубки. Нормальная скорость распространения пламени может быть определена экспериментально, как описано ниже, по так называемому конусу Михельсона, а также известными другими способами [88].

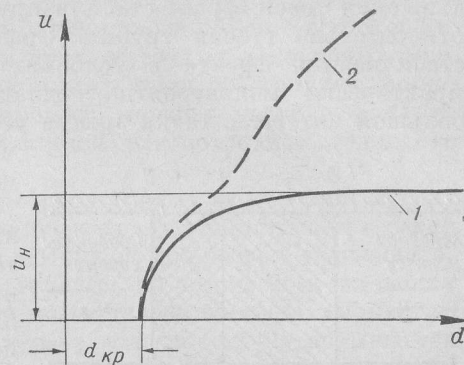


Рис. II-10. Зависимость скорости распространения пламени от диаметра трубки. 1 — теоретическая, 2 — действительная кривая.

§ II-5

ГОРЕНИЕ ПОДГОТОВЛЕННОЙ СМЕСИ

Пламя в ламинарном потоке

Распространение пламени в ламинарном потоке заранее подготовленной газозвушной смеси подчиняется тем же закономерностям, что и для неподвижной смеси, хотя внешняя картина горения в этом случае будет иная.

Представим себе трубку, в которой ламинарно движется со скоростью w_0 холодная смесь газа с теоретически необходимым или избыточным количеством воздуха. В целях упрощения анализа условий ее горения допустим, что стенки трубки теплонепроницаемы, а скорость движения смеси равномерна по всему сечению трубки. Если в каком-либо сечении трубки воспламенить смесь и создать фронт горения, он начнет перемещаться относительно смеси. Очевидно, что в случае, когда скорость перемещения пламени меньше, чем скорость движения смеси, фронт горения будет перемещаться по направлению движения потока и, в конечном итоге, пламя будет вынесено из трубки. Если скорость перемещения фронта больше скорости движения смеси, он будет

перемещаться к началу трубки. Наконец, возможен случай, когда скорость перемещения фронта пламени окажется равной скорости движения смеси, фронт стабилизируется, т. е. будет неподвижным относительно стенок трубки. Сразу же оговоримся, что такая стабилизация фронта в условиях трубки постоянного сечения практически маловероятна, однако этот случай представляет большой интерес с точки зрения установления некоторых закономерностей горения в ламинарном потоке.

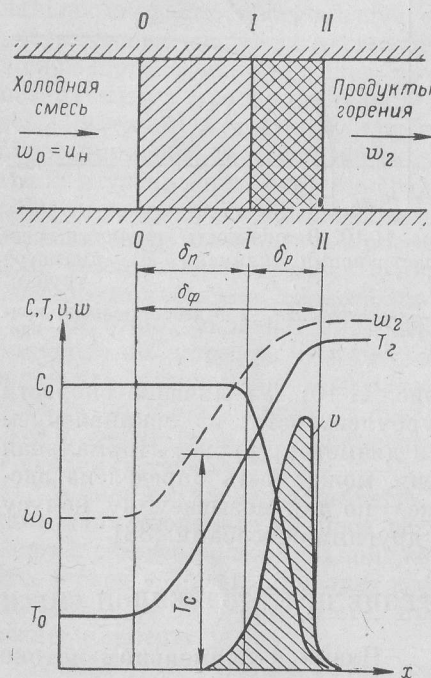


Рис. II-11. Схема плоского фронта пламени.

По мере приближения к сечению I—I смесь нагревается до температуры самовоспламенения, в результате чего в сечении I—I развивается весьма интенсивная реакция горения. В зоне I—II, имеющей глубину $\delta_{\text{р}}$, наблюдается быстрое нарастание скорости реакции v , сопровождающееся ростом температуры и падением концентрации горючего. В сечении II—II концентрация горючего газа в смеси падает практически до нуля и реакция затухает. Далее в трубке будут двигаться уже продукты сгорания. Таким образом, фронт горения складывается из зоны подогрева и зоны реакции, или химического фронта. В сумме обе эти зоны образуют физический фронт горения. Зона подогрева характеризуется наличием огромного градиента температур, а реакция протекает при высокой температуре, поэтому глубина физического фронта го-

рения очень мала (доли миллиметра). Решающее влияние на скорость перемещения фронта пламени оказывают процессы, происходящие в зоне подогрева. В этой зоне наряду с интенсивным нагреванием смеси происходит молекулярный обмен с зоной реакции, т. е. имеет место диффузия промежуточных и конечных продуктов реакции. В некоторых случаях такой массообмен может оказать большее влияние на процесс горения, нежели явления теплообмена, однако мы ограничимся рассмотрением теплового режима горения.

Как было указано ранее, в выбранной нами одномерной модели процесса горения фронт пламени перемещается по нормали к своей плоскости против направления потока со скоростью последнего. Скорость перемещения фронта горения по нормали к элементу поверхности, как указывалось, называется нормальной скоростью горения. Полагая, что температура в зоне подогрева повышается от T_0 до T_c только за счет теплопроводности, можно написать, что

$$\lambda \left(\frac{dT}{dx} \right) = w_0 \rho_0 c_p (T_c - T_0). \quad (\text{II-60})$$

Если ради упрощения повышение температуры в этой зоне принять линейным, то

$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_c - T_0}{\delta_{\text{п}}}. \quad (\text{II-61})$$

С другой стороны, так как $w_0 = u_{\text{н}}$, то

$$\lambda \frac{T_c - T_0}{\delta_{\text{п}}} = u_{\text{н}} \rho_0 c_p (T_c - T_0), \quad (\text{II-62})$$

где λ — коэффициент теплопроводности; ρ_0 — плотность холодной смеси; c_p — массовая теплоемкость смеси.

Чтобы выявить связь между теплофизическими свойствами смеси и нормальной скоростью распространения пламени, условно примем, что изменение температуры не влияет на λ , ρ_0 и c_p , а также на скорость движения смеси и продуктов сгорания. В этом случае

$$\delta_{\text{п}} = \lambda / (u_{\text{н}} \rho_0 c_p) = a / u_{\text{н}}, \quad (\text{II-63})$$

где $a = \lambda / (c_p \rho_0)$ — коэффициент температуропроводности.

Время подогрева смеси

$$\tau_{\text{п}} = \delta_{\text{п}} / u_{\text{н}} = a / u_{\text{н}}^2. \quad (\text{II-64})$$

Из выражения (II-64) следует, что

$$u_{\text{н}} = \sqrt{a / \tau_{\text{п}}}. \quad (\text{II-65})$$

Приведенные формулы не могут служить для расчета глубины зоны и времени подогрева, так как пренебрежение влиянием температуры на искомые величины приводит к грубой ошибке.

Однако можно сделать вывод, что глубина зоны подогрева прямо пропорциональна коэффициенту температуропроводности a и обратно пропорциональна нормальной скорости горения.

Из систем дифференциальных уравнений, описывающих тепло-выделение и теплообмен в зоне реакции, может быть получено выражение нормальной скорости распространения пламени [88]:

$$u_n = \frac{\sqrt{2\lambda\Phi(T_r - T_c)}}{c_p \rho_0 (T_r - T_0)}, \quad (\text{II-66})$$

где Φ — количество тепла, выделяющегося в процессе реакции в единице объема, отнесенное к единице времени.

Очевидно, что

$$\Phi = \frac{c_p \rho_0 (T_r - T_0)}{\tau_p}. \quad (\text{II-67})$$

Подставляя выражение (II-67) в (II-66), получаем

$$u_n = \sqrt{\frac{2\lambda(T_r - T_c)}{c_p \rho_0 (T_r - T_0) \tau_p}}, \quad (\text{II-68})$$

где τ_p — продолжительность реакции; T_r — температура продуктов сгорания.

Из формул (II-68) и (II-64) находим

$$\tau_p = 2 \frac{T_r - T_c}{T_r - T_0} \cdot \frac{\lambda}{u_n^2 c_p \rho_0} = 2 \frac{T_r - T_c}{T_r - T_0} \tau_n = A \tau_n, \quad (\text{II-69})$$

где A — коэффициент, зависящий от температурного режима горения.

Как видно, продолжительность реакции зависит от тех же факторов, что и продолжительность разогрева смеси. Следовательно, продолжительность всего процесса также зависит от коэффициента температуропроводности смеси, нормальной скорости горения и температурных характеристик процесса, т. е.

$$\tau = \tau_n + \tau_p = B(a/u_n^2), \quad (\text{II-70})$$

где B — коэффициент, учитывающий влияние температурного режима.

Выражение (II-70) позволяет сделать вывод, что нормальная скорость горения может быть выражена не только через продолжительность подогрева, но и через скорость реакции или всего процесса с другими постоянными коэффициентами:

$$u_n \approx B \sqrt{a/\tau}. \quad (\text{II-71})$$

Так как время τ является величиной, обратно пропорциональной скорости протекания реакции w , то

$$u_n \approx \sqrt{aw}. \quad (\text{II-72})$$

Сопоставление формул (II-46) и (II-72) позволило Я. Б. Зельдовичу [88] получить следующее соотношение:

$$u_n \approx k \sqrt{\exp\left(-\frac{E}{RT_r}\right)} = k \exp\left(-\frac{E}{2RT_r}\right), \quad (\text{II-73})$$

где k — константа; T_r — температура горения.

Из этого соотношения видно, что на нормальную скорость горения оказывает огромное влияние температура горения. На последнюю, в свою очередь, значительно влияет начальная температура смеси T_0 .

Влияние начальной температуры смеси на максимальную скорость распространения пламени приближенно описывается следующей формулой:

$$u_2 = u_1 (T_2/T_1)^2, \quad (\text{II-74})$$

где u_2 — нормальная скорость распространения пламени при температуре T_2 , °К; u_1 — то же, при температуре T_1 , °К.

Плотность смеси обратно пропорциональна абсолютной температуре, поэтому массовая скорость распространения пламени прямо пропорциональна абсолютной температуре.

Горючая часть газового топлива обычно представляет собой смесь горючих газов. Доля горючих газов в газозвдушной смеси, дающая максимальную скорость распространения пламени, может быть подсчитана по правилу аддитивности (формула Ле Шателье):

$$r = \frac{\sum_1^n r_k}{\sum_1^n r_k/z_k}, \quad (\text{II-75})$$

где $\sum_1^n r_k$ — сумма объемных долей горючих компонентов в составе

горючего газа; $\sum_1^n r_k/z_k$ — сумма отношений объемных долей горючих компонентов к объемным содержаниям этих компонентов в смеси с воздухом, дающих максимальную скорость распространения пламени.

Наличие балластных газов в газозвдушной смеси снижает нормальную скорость распространения пламени. По Л. Н. Хитрину [124], влияние N_2 и CO_2 на u_n следующее:

$$u_{n,6} = u_n (1 - 0,01N_2 - 0,012CO_2). \quad (\text{II-76})$$

где $u_{n,6}$ — скорость распространения пламени в забалластированной смеси.

Нормальные скорости распространения пламени в некоторых газозвдушных смесях показаны на рис. II-12, а также приведены в табл. II-3. Обращает на себя внимание то, что максимум

нормальной скорости соответствует смесям с повышенным против стехиометрического содержанием горючих газов (т. е. $\alpha < 1,0$). По существующим представлениям это объясняется особенностями протекания цепных реакций и условиями создания промежуточных активных центров.

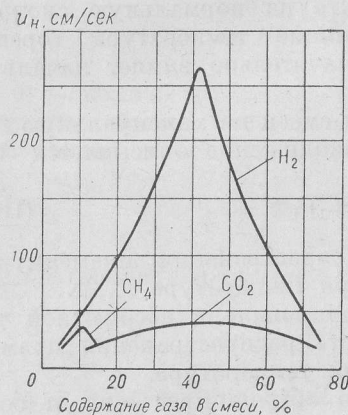


Рис. II-12. Зависимость нормальной скорости распространения пламени от состава смеси.

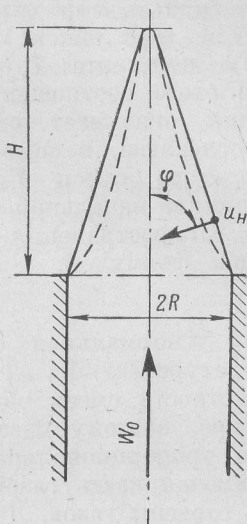


Рис. II-13. Схема ламинарного факела.

Мы рассмотрели важный с точки зрения изучения явления, хотя практически маловероятный, случай стационарного фронта пламени в трубке постоянного сечения. Условием неподвижности

ТАБЛИЦА II-3
Характеристики равномерного распространения пламени для газов

Характеристика	H ₂	CO	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₂ H ₄
Стехиометрическое содержание газа в смеси, % по об.	29,5	29,5	9,5	—	—	—	6,5
Нормальная скорость распространения пламени в стехиометрической смеси, см/сек	160	30	28	—	—	—	50
Содержание газа в смеси, соответствующее максимальной скорости распространения пламени, %	42,0	43,0	10,5	6,3	4,3	3,3	7,0
Максимальная скорость распространения пламени в трубке D = 25 мм	485	125	67	86	82	82	142

фронта пламени, как было указано, должно быть равенство скоростей потока и нормальной скорости распространения пламени.

Однако в реальных условиях имеет место стабилизация горения и при отсутствии равенства этих скоростей. Во-первых, как было указано, горение не может протекать в трубках, каналах, или щелях малого диаметра или ширины. Во-вторых, горение может быть устойчивым при скоростях смеси, во много раз превышающих нормальную скорость распространения пламени, при наличии стабилизаторов горения, т. е. средств надежного воспламенения смеси в какой-либо зоне потока.

В случае ламинарного истечения газоздушной смеси из трубки или сопла на выходе может возникнуть устойчивый факел при скорости смеси, значительно превышающей скорость нормального распространения пламени. Это объясняется, во-первых, падением скорости потока у стенки трубки, характерным для ламинарного движения, во-вторых, образованием завихрений при внезапном выходе потока из трубки. Нужно заметить, что за счет более интенсивного отвода тепла у стенок трубки скорость распространения пламени также падает.

На рис. II-13 показана схема ламинарного факела, называемого конусом Михельсона. По размерам этого конуса и средней скорости движения смеси можно определить (как это было предложено В. А. Михельсоном) нормальную скорость распространения пламени. Если принять, что фронт пламени образует поверхность правильного конуса с диаметром основания $D = 2R$, высотой H (сплошные линии — образующие на рис. II-13), то вектор нормальной скорости распространения пламени u_n во всех точках фронта пламени будет направлен к оси конуса под углом φ . Следовательно,

$$H = R \operatorname{tg} \varphi = R \frac{\sin \varphi}{\cos \varphi} = R \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \varphi} - 1}. \quad (\text{II-77})$$

С другой стороны, $\cos \varphi = u_n / w_0. \quad (\text{II-78})$

За единицу времени смесь проходит путь w_0 , а фронт пламени — u_n по нормали к боковой поверхности конуса и под углом φ к направлению скорости w_0 .

Подстановка выражения (II-78) в (II-77) дает:

$$H = \frac{D}{2} \sqrt{\left(\frac{w_0}{u_n}\right)^2 - 1}, \quad (\text{II-79})$$

$$u_n = w_0 \cos \varphi = \frac{1}{2} w_0 D \sqrt{\frac{1}{H^2 + (D/2)^2}}. \quad (\text{II-80})$$

В действительности фронт образует не правильный конус, как принимается в упрощенной модели, а поверхность с криволинейной образующей (штриховая линия на рис. II-13). Отклонение поверхности фронта пламени от конической вызывается

неравномерностью скоростей потока и распространения пламени по сечению трубки или сопла.

Горение газа в ламинарном потоке, представляя значительный теоретический интерес, редко имеет место в промышленных установках из-за больших тепловых нагрузок горелок.

Устойчивость ламинарного пламени

Скорость смеси на оси вытекающего потока на некотором протяжении по выходе из сопла сохраняет начальную величину, а затем плавно снижается. Так как на оси струи вектор скорости распространения пламени направлен по оси и противоположен вектору скорости струи, то в широком диапазоне изменения выходных скоростей горение оказывается устойчивым. Это объясняется

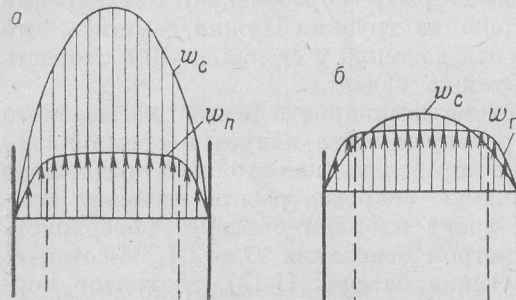


Рис. II-14. Распределение скоростей пламени и потока в случае отрыва (а) и проскока (б).

тем, что на оси ламинарного факела на том или ином расстоянии от сопла существует точка, в которой локальная скорость смеси и скорость распространения пламени окажутся равными.

В случае снижения скорости выхода смеси ниже известного предела горение нарушится из-за проскока пламени в трубку и смеситель. Такое явление, безусловно, будет наблюдаться, если скорость на оси ламинарной струи окажется меньше нормального распространения пламени.

Из-за параболического характера изменения профиля скоростей по сечению ламинарной струи у стенок скорость падает до нуля, однако это не обязательно приводит к проскоку, так как из-за охлаждающего действия стенок местная скорость распространения пламени здесь также падает до нуля.

По Э. Б. Льюису и Г. Эльбе [70], проскок будет наблюдаться в том случае, когда вблизи стенок кривые скоростей смеси w_c и распространения пламени w_n имеют касательные с одинаковыми угловыми коэффициентами (рис. II-14), т. е.

$$\left(\frac{dw}{dr}\right)_{r \rightarrow R} = \left(\frac{dw}{dr}\right)_{r \rightarrow R}, \quad (\text{II-81})$$

где r — текущий радиус; R — радиус выходного сечения горелки.

Так как при ламинарном движении

$$w = w_0 \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right),$$

получим

$$\frac{dw}{dr} = -\frac{2w_0 r}{R^2} \quad \text{и} \quad \left(\frac{dw}{dr}\right)_{r \rightarrow R} = -\frac{2w_0}{R}. \quad (\text{II-82})$$

Это соотношение и определяет нижний предел устойчивости кинетического ламинарного факела.

Горение в турбулентном потоке

Если течение в трубке характеризуется значением критерия Рейнольдса (Re), большим чем 2300, ламинарный поток становится неустойчивым и переходит в турбулентный. Поверхность фронта пламени теряет правильную геометрическую форму. Возникающие пульсации скорости искажают эту поверхность, однако при умеренной турбулентности она остается непрерывной (мелкомасштабная турбулентность).

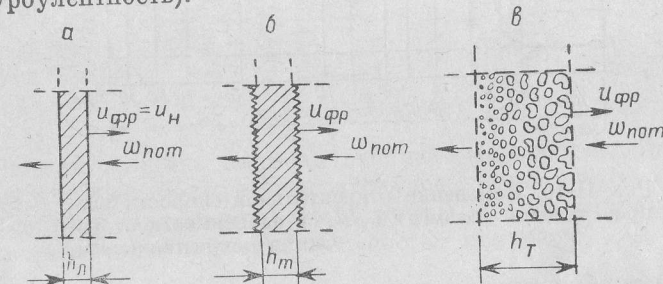


Рис. II-15. Фронт горения.

а — ламинарное движение; б — мелкомасштабная турбулентность; в — крупномасштабная турбулентность.

При увеличении турбулентности, когда масштаб ее становится больше толщины фронта горения, происходят отрывы отдельных элементов фронта с образованием изолированных очажков горения, движущихся в потоке смеси или продуктов сгорания и продолжающих дробиться в процессе догорания. Такое явление характерно для крупномасштабной турбулентности.

На рис. II-15 показаны схемы ламинарного и турбулентного фронтов горения. Ламинарный фронт (а) глубиной h_l включает зону подогрева и зону реакции (масштаб турбулентности $l = 0$). Турбулентный фронт (б) создается при горении в турбулентном потоке, когда выполняется условие $0 < l < h_l$. Наличие турбулентных пульсаций увеличивает ограничивающие поверхности фронта как со стороны свежей смеси, так и со стороны продуктов сгорания.

В случае, когда масштаб турбулентности больше глубины фронта ($l < h_{л}$), зона горения разбивается на отдельные очажки (b) и суммарная поверхность фронта горения сильно возрастает. В результате такого увеличения поверхности увеличивается скорость перемещения фронта пламени $u_{фр}$; другими словами, турбулентная скорость распространения пламени оказывается значительно выше нормальной скорости распространения пламени. На рис. II-16 показан пример роста относительной скорости распространения пламени в газозвушной смеси.

Строгий анализ явлений, имеющих место в турбулентном факеле, непреодолимо сложен, поэтому многочисленные авторы,

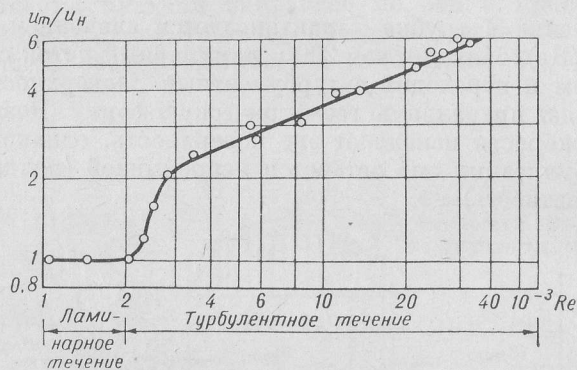


Рис. II-16. Изменение относительной скорости распространения пламени $u_{м.т}/u_H$ в зависимости от режима движения смеси.

изучавшие турбулентное горение, вынуждены были идти на значительные упрощения, которые в той или иной степени искажают действительную картину. В настоящее время существуют два представления о механизме турбулентного горения: «фронтальная» и «объемная» теории горения.

Согласно «фронтальной» теории, сторонниками которой являются К. И. Шелкин [131], Г. Дамкеллер [88], отдельные молекулы смеси сгорают с поверхности, причем выгорание определяется величиной нормальной скорости горения. Совокупность таких горящих молекул образует турбулентный фронт пламени. Вторая модель, т. е. теория «объемного» горения, сторонниками которой являются М. Саммерфильд, Е. С. Щетинков [88] и другие, исходит из того, что элементарные объемы (молекулы) смеси горят в пределах объема.

Рассмотрим основные закономерности турбулентного горения с позиций «фронтальной» теории. Если принять, что общая осредненная поверхность фронта горения при мелкомасштабной турбулентности равна $F_{м.т}$, а при ламинарном горении — $F_{л}$, то турбулентная скорость распространения пламени

$$u_{м.т} = u_H (F_{м.т}/F_{л}). \quad (II-83)$$

Нормальная скорость горения, как следует из формулы (II-65), связана с коэффициентом температуропроводности. Аналогично в случае мелкомасштабной турбулентности турбулентная скорость горения

$$u_{м.т} = \sqrt{A/\tau'_п}, \quad (II-84)$$

где A — суммарный коэффициент температуропроводности, т. е.

$$A = a + w'l', \quad (II-85)$$

где l' — масштаб турбулентности; w' — средняя величина пульсационных скоростей; $w'l'$ — коэффициент турбулентного обмена.

Тогда

$$u_{м.т} = \sqrt{(a + w'l')/\tau'_п}. \quad (II-86)$$

Полагая, в первом приближении, продолжительность прогрева подводимой к фронту горения смеси одинаковой как для ламинарного, так и для турбулентного режимов, т. е. $\tau_п = \tau'_п$, можем записать

$$u_{м.т} = \sqrt{\frac{a}{\tau_п} \left(1 + \frac{w'l'}{a}\right)} = u_H \sqrt{1 + \frac{w'l'}{a}}, \quad (II-87)$$

или

$$\frac{u_{м.т}}{u_H} = \sqrt{1 + \frac{w'l'}{a}} = \frac{F_{м.т}}{F_{л}}. \quad (II-88)$$

Видимая толщина пламени в случае мелкомасштабной турбулентности будет больше, чем в случае ламинарного потока.

Принимая зависимость, аналогичную (II-64), также и для случая мелкомасштабной турбулентности, получаем

$$\delta_{м.т} = \frac{A}{u_{м.т}} = \frac{a \left(1 + \frac{w'l'}{a}\right)}{u_H \sqrt{1 + \frac{w'l'}{a}}} = \frac{a}{u_H} \sqrt{1 + \frac{w'l'}{a}}, \quad (II-89)$$

или

$$\delta_{м.т} = \delta_п \sqrt{1 + \frac{w'l'}{a}}. \quad (II-90)$$

В случае крупномасштабной турбулентности, модель которой описана выше, турбулентная скорость горения $u_{к.т}$ может быть выражена формулой [88]

$$u_{к.т} = u_H \sqrt{1 + B \left(\frac{w'}{u_H}\right)^2}, \quad (II-91)$$

где B — безразмерный множитель, зависящий от физико-химических свойств топлива. В среднем $B = 1$, т. е.

$$u_{к.т} = u_H \sqrt{1 + \left(\frac{w'}{u_H}\right)^2}.$$

Как следует из формул (II-87) и (II-91), при ламинарном движении потока $u_{к.т} = u_{к.т} = u_n$, так как $w' = 0$. В случае крупномасштабной турбулентности, когда w' значительно больше u_n ,

$$u_{к.т} \approx w' B \approx w', \quad (II-92)$$

т. е. турбулентная скорость распространения пламени уже не зависит от нормальной скорости, а следовательно, от свойств газа и примерно равна пульсационной скорости. Однако этот вывод оспаривается рядом авторов, в частности сторонниками «объемной» теории горения, и в некоторой степени расходится с экспериментальными данными.

Стабилизация турбулентного факела еще более важна, нежели стабилизация ламинарного, из-за значительно более высоких скоростей турбулентного горения. Во избежание проскока скорость вытекающей из горелки смеси в этом случае также должна быть значительно выше.

При решении вопроса стабилизации турбулентного факела следует иметь в виду, что локальные скорости турбулентных пульсаций и масштаб турбулентности переменны как по сечению устья горелочной головки, так и во времени. У стенок они равны нулю, а в центральной части меняются по сложным законам.

На рис. II-17 показаны замеренные величины, характеризующие турбулентный поток в трубе.

§ II-6. ДИФФУЗИОННОЕ ГОРЕНИЕ

Внешняя картина диффузионного горения

Если количество воздуха в смеси, вытекающей из горелки, ниже минимально необходимого, то полное сгорание возможно лишь при подаче вторичного воздуха за пределами горелки (в топку) и перемешивании его с вытекающей смесью за счет молекулярной или турбулентной диффузии. В этом случае у устья горелки наблюдается первичный конус горения, в котором сгорает только часть газа, соответствующая количеству первичного воздуха. За фронтом первичного горения будет наблюдаться поток несгоревшего газа, забалластированный продуктами сгорания. При

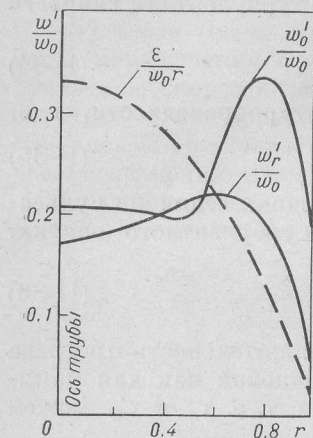


Рис. II-17. Распределение пульсационных скоростей и масштабов турбулентности в трубе.

w'_0 — продольная пульсационная скорость; w'_r — поперечная пульсационная скорость; w_0 — средняя скорость потока; r — радиус; $\varepsilon = w'l'$ — коэффициент турбулентного обмена.

подводе к этому потоку вторичного воздуха создается второй фронт горения.

Не следует думать, что за первичным фронтом горения будут находиться просто смесь продуктов сгорания и части несгоревшего газа в его первоначальном виде. В пределах фронта первичного горения происходит неполное сгорание газов с образованием продуктов частичного окисления.

По мере уменьшения количества первичного воздуха доля газа, сгорающего в первичном конусе, будет непрерывно уменьшаться, а в диффузионной зоне — увеличиваться, что приведет к удлинению последней. Высота первичного конуса будет также меняться. Характер этого изменения определяется характером изменения отношения w/u_n . Если при снижении количества первичного воздуха скорость выхода смеси будет падать быстрее, чем нормальная скорость распространения пламени u_n , то высота конуса сократится. При сжигании углеводородных газов снижение количества первичного воздуха обычно приводит к сокращению высоты первичного конуса.

В промышленных установках, в частности при сжигании газа под котлами, широко применяются горелки, которые следует отнести к промежуточным типам между кинетическими и диффузионными. В таких горелках, хотя в смеси-тельную камеру и подается все необходимое для

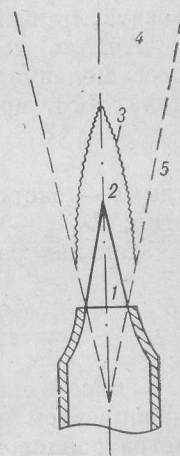


Рис. II-18. Схема диффузионного ламинарного факела.

горения количество воздуха, процесс смешения не завершается, окончание его переносится в топку.

Снижение количества первичного воздуха до нуля переводит горение целиком в диффузионную область. При ламинарном истечении газа факел сильно растягивается, но сохраняет правильную геометрическую форму.

Рассмотрим подробнее механизм диффузионного сгорания, а также структуру и закономерности диффузионного факела. На рис. II-18 представлена упрощенная схема диффузионного ламинарного факела, создающегося при истечении вертикальной струйки газа в неподвижный воздух. В факеле можно отметить следующие характерные зоны. Внутри факела находится темная зона 1, состоящая из одного газа первоначального состава без примеси воздуха. В непосредственной близости от фронта горения эта зона переходит в зону 2, в которой наблюдается нарастающее содержание продуктов сгорания. Далее находится поверхностная оболочка фронта горения 3, имеющего небольшую толщину. Эта оболочка может при известных условиях начинаться

непосредственно от выходного отверстия газовой струи, а может быть и отнесена от него на значительное расстояние. В среднем по толщине фронта горения имеет место стехиометрическое соотношение количества газа и воздуха ($\alpha = 1,0$). За пределами фронта горения располагается нарастающая в направлении развития факела зона 4 смеси продуктов сгорания и воздуха. В этой зоне имеет место движение продуктов сгорания от фронта наружу и движение воздуха из внешней среды (зона 5) к фронту горения. Эти перемещения масс происходят под влиянием турбулентной или молекулярной диффузии. Одновременно в пределах всех рассмотренных зон имеет место также движение вдоль оси факела за счет кинетической энергии вытекающей газовой струи и возникающих гравитационных сил. В зоне 5 находится окружающий воздух, лишенный газа и продуктов его сгорания.

Анализ дифференциального уравнения, описывающего процесс молекулярной диффузии в цилиндрической системе координат [88], приводит к выводу, что высота ламинарного пламени

$$H = wR^2 / (2D_{м.д}), \quad (II-93)$$

где w — скорость истечения газа; R — радиус соплового отверстия; $D_{м.д}$ — коэффициент молекулярной диффузии.

Так как расход газа

$$V_r = w\pi R^2, \quad (II-94)$$

то

$$H = V_r / (2\pi D_{м.д}), \quad (II-95)$$

т. е. высота пламени определяется только расходом газа V_r и коэффициентом молекулярной диффузии $D_{м.д}$ и не зависит от диаметра соплового отверстия.

С изменением скорости истечения газа и диаметра соплового отверстия характер диффузионного факела меняется. При малых скоростях истечения газа факел имеет правильные устойчивые очертания (рис. II-19), фронт пламени начинается непосредственно у соплового отверстия. Массообмен в пределах рассмотренных зон происходит за счет молекулярной диффузии, т. е. вытекающая струя и весь факел имеют ламинарный характер. С увеличением скорости размеры факела растут, достигая некоторого максимума. Одновременно начинает теряться правильность очертаний и стабильность его вершины, появляются отдельные языки пламени. Начинается турбулизация факела, захватывающая все большую его длину. По мере приближения турбулентного фронта к корню факела высота его несколько снижается, оставаясь далее более или менее постоянной. По достижении некоторой критической скорости газовой струи весь факел становится турбулентным и происходит отрыв фронта пламени от соплового отверстия, фронт все более удаляется, горение сопровождается характерным шумом. При дальнейшем увеличении скорости факел срывается и горение прекращается.

Переход диффузионного факела в неподвижной воздушной среде от ламинарного режима горения к турбулентному наблюдается для разных газов при различных значениях Re . По данным Гаусорна, Уэдделла и Хоттела, для водорода Re составляет около 2200, для городского (коксового) газа — 3700—4000, для окиси углерода — около 4750, для пропана и ацетилена — 8900—10 400. Обобщенная зависимость перехода ламинарного факела в турбулентный отсутствует.

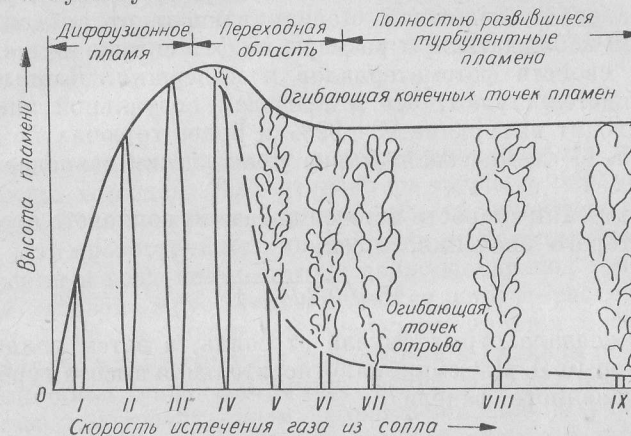


Рис. II-19. Изменение длины свободного диффузионного факела в зависимости от скорости истечения газа.

I—III — ламинарное горение; IV—VI — переходный режим; VII—IX — турбулентное горение.

Закономерности формирования турбулентных диффузионных факелов в неограниченном свободном воздушном пространстве изучались многими авторами и здесь не рассматриваются.

Размеры турбулентного диффузионного факела

Для наиболее полной реализации достоинств газового топлива важно знать особенности и условия формирования газового факела, его геометрические, химические и радиационные характеристики в зависимости от смесеобразования и организации процесса горения. Хотя решением этих вопросов занимались и занимаются многие институты и лаборатории как за рубежом, так и в СССР, задача определения достаточно точных характеристик факела до сих пор не решена как в теоретическом плане, так и экспериментально.

Наиболее полные данные опубликованы лишь относительно длины свободного диффузионного факела. Факел горящего газа, развивающийся в пламенном пространстве технологического агрегата, несомненно, очень сильно отличается от свободного факела

как размерами, так и наличием внешних воздействий, меняющих все его характеристики. Тем не менее изучение отдельных свободных факелов, в частности его длины, представляет интерес, так как позволяет установить качественные зависимости между основными характеристиками горелки и факела.

Говоря о размерах, в частности о длине газового факела, отметим, что речь может идти о наблюдаемой «визуальной», «фотографической» и так называемой «химической» длине. Визуальные размеры факела в известной степени зависят от субъективных особенностей наблюдателя, а размеры на фотоснимке — в сильной степени от свойств фотоматериалов и выдержки. Данные ряда авторов свидетельствуют, что в пределах визуальной длины факела происходит выгорание 98—99% и более горючих компонентов смеси, т. е. «химическая» длина практически совпадает с визуальной.

При повышении скорости истечения газа из соплового отверстия выше некоторого значения, м/сек,

$$w_{cp} = 15 \sqrt{0,2d^2 + 1} \quad (II-96)$$

происходит сначала отрыв факела от сопла, а затем полный его срыв. По данным И. Д. Семикина, относительная высота турбулентного диффузионного факела

$$l/d = 11 \left(1 + V_0 \frac{\rho_B}{\rho_r}\right). \quad (II-97)$$

По данным Гаусорна, Уэдделла и Хоттелла, длина факела в зависимости от характеристик газа

$$l/d = 5,3 \sqrt{\frac{T_\phi(1+V_0)}{T_r\sigma} \left(1 + V_0 \frac{\rho_B}{\rho_r}\right)}, \quad (II-98)$$

где T_ϕ — теоретическая температура пламени, °К; T_r — температура вытекающего газа, °К; σ — отношение числа молей реагирующих веществ к числу молей продуктов реакции для стехиометрической смеси.

В ряде экспериментов отмечено незначительное возрастание высоты факела по мере роста скорости истечения газа. По данным П. В. Левченко и Б. И. Китаева [111], относительная длина факела

$$\frac{l}{d} = 20k \left(\frac{w_r^2}{gd}\right)^{0,17}, \quad (II-99)$$

где w_r — скорость истечения газа, м/сек; g — ускорение силы тяжести, м/сек²; k — коэффициент, зависящий от рода газа; для генераторного газа $k = 0,6$; для коксового $k = 1,0$; для природных и попутных газов значение k не приводится.

Экспериментальные исследования свободных турбулентных диффузионных факелов проводились в Куйбышевском политех-

ническом институте (КПТИ) при сжигании бугуруслано-похвистневского природного газа. В результате этих опытов установлено, что формула (II-99) дает удовлетворительные результаты для природного газа при значении $k = 1,5$.

Влияние скорости на размеры турбулентного диффузионного факела, отмечаемое также рядом других авторов, все же невелико, а поэтому без большой погрешности можно полагать, что $l/d = A = \text{const}$. Константа определяется свойствами газа и не зависит от условий истечения. Максимальный диаметр факела D также зависит только от диаметра сопла и свойств газа. Приближенно можно принять

$$D/l = 0,10 \div 0,15. \quad (II-100)$$

Приведенные зависимости длины турбулентного диффузионного факела горящего газа от размера сопла и параметров газа справедливы для случая горения газа в атмосфере одиночной струей. Для многоструйного диффузионного горения газа, а также при горении в воздушном потоке, движущемся под тем или иным углом к газовой струе, геометрические характеристики факела, разумеется, сильно меняются. Факел удлиняется в спутном потоке воздуха, а также меняет свою форму и размеры под влиянием гравитационных сил. Например, факел при выходе свободной струи газа в горизонтальном направлении сильно укорачивается и отклоняется вверх. При некоторой скорости потока факел не стабилизированный какими-либо устройствами, срывается и горение прекращается. Для указанных выше диаметров сопел срыв факела происходит при величине скорости воздушного потока порядка 12—15% от скорости истечения газа.

При сжигании газа в промышленных топках всегда имеет место значительное искажение факела и отклонение его форм и размеров от расчетных, однако приведенные выше соотношения в значительной части сохраняют свою ценность, так как позволяют установить качественную картину горения и правильно отражают влияние параметров газа и диаметра газовых струй.

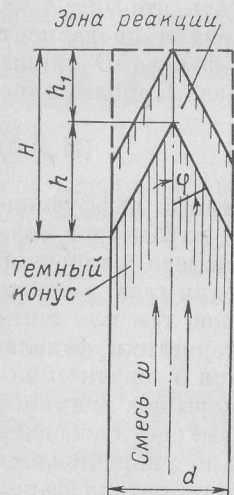
§ II-7. ТЕПЛОВЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ ОБЪЕМА СГОРАНИЯ

Как при предварительном смесеобразовании, так и при диффузионном сжигании газового топлива тепловое напряжение топочного пространства не является достаточно устойчивой характеристикой процесса. В зависимости от организации горения эта величина колеблется в очень широких пределах. Более или менее точный аналитический расчет максимально допустимых тепловых напряжений возможен только для отдельных случаев горения смеси в ламинарном потоке.

Приведенные ниже выводы и зависимости имеют целью выявить лишь качественную картину, определяющую влияние различных факторов на допустимое тепловое напряжение топочного объема.

Кинетическое сгорание

Примем следующую физическую модель процесса. Смесь ламинарным потоком со скоростью w вытекает из устья горелки диаметром d . В выходном сечении по периметру осуществляется зажигание смеси (рис. II-20). Внутренний темный конус имеет высоту h , высота физической зоны горения h_1 . Принимаем, что конус горения имеет правильную геометрическую форму с линейной образующей. В пределах физической зоны горения средняя скорость потока w_1 больше, чем скорость смеси в устье горелки, из-за повышения температуры при сгорании и молекулярного изменения объема. Сечения потока до и после сгорания принимаем равными, что соответствует сгоранию в трубке.



Приняв продолжительность реакции горения от начала процесса до практически полного выгорания горючих τ , найдем

$$h_1 = w_1 \tau = \beta w \tau,$$

Рис. II-20. Схема кинетического ламинарного факела.

где β — коэффициент увеличения скорости потока при сгорании. По формуле (II-79) высота конуса Михельсона

$$h = \frac{d}{2} \sqrt{\left(\frac{w}{u_H}\right)^2 - 1}. \quad (\text{II-101})$$

Полная высота факела

$$H = h_1 + h = w \left(\frac{d}{2} \sqrt{\frac{1}{u_H^2} - \frac{1}{w^2} + \beta \tau} \right). \quad (\text{II-102})$$

Объем цилиндра (топки) от устья горелки до конца факела, м^3 ,

$$V = \frac{\pi d^2}{4} H.$$

Тепловыделение в горящем факеле (при температуре вытекающей смеси 0°C)

$$Q = \frac{\pi d^2}{4} w \frac{Q_{p.н}}{1 + \alpha V_0} \quad (\text{II-103})$$

Максимальное тепловое напряжение топочного объема, $\text{ккал}/(\text{м}^3 \cdot \text{ч})$,

$$\left[\frac{Q}{V} \right]_{\max} = \frac{3600 Q_{p.н}}{(1 + \alpha V_0) \left(\frac{d}{2} \sqrt{\frac{1}{u_H^2} - \frac{1}{w^2} + \beta \tau} \right)}. \quad (\text{II-104})$$

Так как $V_0 = 1,12 \cdot 10^{-3} Q_{p.н}$, то

$$\left[\frac{Q}{V} \right]_{\max} = \frac{3600 Q_{p.н}}{(1 + 1,12 \cdot 10^{-3} \alpha Q_{p.н}) \left(\frac{d}{2} \sqrt{\frac{1}{u_H^2} - \frac{1}{w^2} + \beta \tau} \right)}. \quad (\text{II-105})$$

Продолжительность реакции τ обратна скорости реакции, поэтому из формулы (II-46)

$$\tau = \frac{1}{w} = \frac{1}{k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) f(C)} = A \exp\left(\frac{E}{RT}\right),$$

где A — коэффициент, зависящий от свойства газа. Следовательно,

$$\left[\frac{Q}{V} \right]_{\max} = \frac{3600 Q_{p.н}}{(1 + 1,12 \cdot 10^{-3} \alpha Q_{p.н}) \left[\frac{d}{2} \sqrt{\frac{1}{u_H^2} - \frac{1}{w^2} + A \beta \exp\left(\frac{E}{RT}\right)} \right]}.$$

Из полученной формулы видно, что тепловое напряжение топочного объема при кинетическом сжигании газа в ламинарном потоке возрастает с увеличением теплоты сгорания газа и нормальной скорости распространения пламени и уменьшается с повышением диаметра струи, ее скорости, коэффициента избытка воздуха и температурного уровня реакции.

Продолжительность реакции горения при обычных температурах в топках очень мала и составляет для метана величину порядка $4 \cdot 10^{-3}$, для водорода — $1 \cdot 10^{-7}$ сек. Поэтому продолжительность реакции заметно сказывается на тепловом напряжении точки только для горящих струек очень малых диаметров. Скорость смеси на выходе из горелки при ее номинальной производительности обычно в 30—40 раз превышает нормальную скорость распространения пламени, так как иначе появляется опасность проскока пламени при малых нагрузках горелки. Следовательно, подкоренная величина в знаменателе формулы не может быть очень малой.

Кроме того, рассматривая случай сжигания природного или попутного газов, теплота сгорания которых выше $7000 \text{ ккал}/\text{м}^3$, можно без особого ущерба для правильности выводов полагать, что доля газа в смеси составляет 8—12% ее объема. Тогда при сгорании в туннелях, трубках или каналах максимальное тепловое напряжение топочного объема, $\text{ккал}/(\text{м}^3 \cdot \text{ч})$,

$$\left[\frac{Q}{V} \right]_{\max} \approx \frac{3600 \cdot 10^3 u_H}{0,62 \alpha \left[d \sqrt{1 - \left(\frac{u_H}{w}\right)^2} + 2 u_H \beta A \exp\left(\frac{E}{RT}\right) \right]},$$

и так как $\left(\frac{u_n}{w}\right)^2 \ll 1,0$, то

$$\left[\frac{Q}{V}\right]_{\max} \approx \frac{5800 \cdot 10^3 u_n}{\alpha \left[d + 2u_n \beta A \exp\left(\frac{E}{RT}\right) \right]} \quad (\text{II-106})$$

Из этой формулы видно, что тепловое напряжение при сжигании газа с высокой теплотой сгорания практически от нее не зависит, а определяется величинами α , d и характеристиками газа и температурным уровнем процесса горения.

При уменьшении диаметра струи смеси тепловое напряжение будет возрастать и достигнет максимума при $d \rightarrow 0$ и $\alpha = 1$:

$$\lim \left[\frac{Q}{V}\right] \approx \frac{2900 \cdot 10^3}{\beta A \exp\left(\frac{E}{RT}\right)} = \frac{2900}{\beta \tau} \quad (\text{II-107})$$

Следовательно, при бесконечном уменьшении диаметра струйки смеси тепловое напряжение топочного объема стремится к напряжению плоского фронта пламени (речь идет о минимальном объеме цилиндрической точки — трубки).

Диффузионное сгорание

В случае диффузионного сгорания тепловое напряжение можно определить исходя из длины и диаметра свободного факела. Длину факела можно определить по формуле (II-98); диаметр факела $D \approx 0,125l$. Объем трубки, представляющей точку, от сопла до конца факела

$$V = \frac{\pi D^2}{4} l = \frac{\pi}{4} \cdot 2,33d^3 \left[\frac{T_\Phi}{T_\Gamma \sigma} (1 + V_0) \left(1 + V_0 \frac{\rho_B}{\rho_\Gamma} \right) \right]^{3/2} \quad (\text{II-108})$$

Тепловыделение в факеле при полном сгорании газа и скорости его истечения w , м/сек (полагая $T_\Gamma = 273^\circ\text{K}$),

$$Q = 3600 \frac{\pi d^2}{4} w Q_{н.с.} \quad (\text{II-109})$$

Максимальное тепловое напряжение топочного пространства, ккал/(м³·ч),

$$\left[\frac{Q}{V}\right]_{\max} = \frac{w Q_{р.н}}{2,33d \left[\frac{T_\Phi}{T_\Gamma \sigma} (1 + V_0) \left(1 + V_0 \frac{\rho_B}{\rho_\Gamma} \right) \right]^{3/2}} \quad (\text{II-110})$$

Принимая в целях упрощения объем природного или попутного газов за 10—12% от объема смеси, после простейших преобразований получаем

$$\left[\frac{Q}{V}\right]_{\max} \approx B \frac{w}{d}, \quad (\text{II-111})$$

где

$$B = \frac{17,5}{(Q_{р.н})^2} \left(\frac{T_\Gamma}{T_\Phi} \cdot \frac{\rho_\Gamma}{\rho_B} \sigma \right)^{1,5} \quad (\text{II-112})$$

Таким образом, тепловое напряжение при диффузионном сгорании газа в потоке с крупномасштабной турбулентностью прямо пропорционально скорости истечения газа, обратно пропорционально диаметру сопла и зависит от свойств и параметров газа. Коэффициент B , в свою очередь, пропорционален температуре и плотности газа в степени 1,5 и обратно пропорционален квадрату теплоты сгорания газа. Следовательно, газы с меньшей теплотой сгорания можно сжигать в диффузионном факеле с более высокими тепловыми напряжениями. Однако надо иметь в виду, что у природных и попутных газов вместе с повышением теплоты сгорания обычно наблюдается одновременное повышение ρ_Γ и σ , что в известной степени компенсирует влияние $Q_{р.н}$ на тепловое напряжение.

Так как свойства большинства природных газов мало отличаются от свойств метана, определим для него значение коэффициента B . Подставив значения $Q_{р.н} = 8560$ ккал/м³, $\rho_\Gamma = 0,717$ кг/м³, $T_\Phi = 2338^\circ\text{K}$, $T_\Gamma = 273^\circ\text{K}$ и $\sigma \approx 1,0$ в формулу (II-112), получим, ккал/(м³·ч),

$$\left[\frac{Q}{V}\right]_{\max} = 192 \frac{w}{d} \quad (\text{II-113})$$

В промышленных горелках низкого давления скорость истечения газа лежит в пределах 30—50 м/сек, диаметры сопловых отверстий обычно выбираются 5—10 мм. Для этих значений w и d максимальные тепловые напряжения, подсчитанные по формуле (II-113), составляют 600—1600 Мкал/(м³·ч). В котельных газовых топках обычно наблюдаются тепловые напряжения (для диффузионного сгорания газа) в пределах 250—500 Мкал/(м³·ч), что свидетельствует о плохом использовании топочного объема для формирования газового факела.

Полученные формулы не могут дать надежных цифр теплового напряжения для расчета промышленных газовых топков, так как условия смесеобразования и воспламенения в них сильно отличаются от принятых в выводе, но порядок величин и влияние отдельных факторов на допустимые напряжения отражены достаточно правильно. Турбулизация подводимого воздуха, направление его под углом к газовым струйкам, истечение газа по пересекающимся направлениям, размещение на пути потока насадок и различных препятствий — все это может заметно увеличить допустимые тепловые напряжения.

§ II-8.

ОСОБЕННОСТИ ГОРЕНИЯ ПРИРОДНЫХ И ПОПУТНЫХ ГАЗОВ

Процессы окисления углеводородов, составляющих органическую часть природных и попутных газов, являются наиболее сложными. До сего времени отсутствуют четкие представления о кинетическом механизме протекания реакций, хотя можно

с уверенностью сказать, что горение имеет цепной характер при наличии периода индукции и протекает с образованием многочисленных промежуточных продуктов частичного окисления и разложения.

Хотя начальные и конечные продукты реакции горения — газы, в промежуточных продуктах помимо газов может быть элементарный углерод в виде мельчайшей сажистой взвеси в факеле. Реакции окисления углеводородов начинаются при более низких температурах, чем окисление CO и H_2 . В присутствии катализаторов эти реакции наблюдаются, начиная с температур порядка 100°C , после чего наступает пламенное горение. Так как реакции горения углеводородов имеют цепной характер и протекают со сравнительно большим индукционным периодом, процесс горения сопровождается в той или иной степени термическим распадом исходных молекул. Этот распад происходит из-за тепловой неустойчивости углеводородов, выражающейся в том, что при нагревании в зависимости от температуры, длительности ее воздействия и ряда других факторов они претерпевают изменение химической структуры, начиная от простого расщепления до перегруппировки атомов в углеводородные соединения другого гомологического ряда. Эти новые углеводороды являются также теплоустойчивыми, так что конечными продуктами такого процесса, если он достаточно длителен, все же являются углерод и водород. Из всех углеводородов наиболее устойчивым является метан, теплоустойчивость других уменьшается с увеличением молекулярной массы.

При обычных температурах в топках ($1000\text{--}1500^\circ\text{C}$) углеводороды, включая метан, даже в очень малые промежутки времени в результате термического разложения дают заметные количества элементарного углерода. В результате появления в факеле элементарного углерода процесс горения в известной степени приобретает элементы гетерогенного, т. е. протекающего на поверхности твердых частиц. Наличие катализаторов (окислов железа, никеля) значительно ускоряет процесс разложения метана и других углеводородов.

Таким образом, в топке или рабочем пространстве печи между моментом ввода газа и воздуха и получением конечных продуктов горения в результате наложения процесса термического распада углеводородов и цепной реакции окисления наблюдается весьма сложная картина, характеризующаяся наличием как продуктов окисления CO_2 и H_2O , так и CO , H_2 , элементарного углерода и продуктов неполного окисления (из последних особо важное значение имеет формальдегид). Соотношение между указанными компонентами будет зависеть от условий и длительности нагревания газа, предшествующего реакциям окисления. Если в самом начале процесса нагревания при наличии первичного воздуха в газозвушной смеси образуется формальдегид, то выделение сажистого углерода в дальнейшем процессе замедляется.

При вводе в топку хорошо подготовленной смеси газа с необходимым количеством воздуха и очень быстром подогреве этой смеси до температуры, превышающей температуру самовоспаления, реакции окисления протекают настолько быстро, что термический распад углеводородов практически не происходит, а элементарный углерод в факеле будет отсутствовать. Такие условия горения приведут к тому, что факел горячей смеси будет прозрачным, малосветящимся. Быстрый прогрев смеси и создание многочисленных источников воспламенения осуществляются за счет дробления потока и направления его через раскаленную насадку, или на раскаленную поверхность, наброску и т. п. Тепловые напряжения объема сгорания в этом случае могут достигнуть огромных величин — десятков и даже сотен гигакалорий на кубический метр в час.

Другие условия горения создаются в том случае, когда газ и воздух подаются в топку раздельно и процессу горения предшествует не только нагревание смеси и индукционный период, но и смесеобразование. При достаточно больших диаметрах газовых струй и истечении газа с умеренными скоростями смесеобразование требует значительно большего времени, чем нагревание.

Количество выделившегося углерода и степень светимости факела в прочих равных условиях будут тем больше, чем выше углеводородное число природного газа, т. е. чем больше в нем углеводородов тяжелее метана. Как указано ранее, тепловое напряжение топочного объема в этом случае значительно ниже, а коэффициент избытка воздуха выше, чем для кинетического горения.

Условия горения углеводородов (в качественном отношении) частично иллюстрируются рис. II-21. Общая продолжительность пребывания исходных углеводородов в топке при кинетическом горении τ' складывается из продолжительности прогрева смеси до температуры самовоспаления $\tau_{\text{п}}$ и продолжительности собственно реакции $\Delta\tau$. Так как общая продолжительность τ' мала, то количество выделяющегося углерода будет исчезающе мало вследствие того, что оно экспоненциально зависит от времени. В случае диффузионного горения общая продолжительность процесса τ'' складывается из продолжительности диффузионного перемешивания газа с воздухом $\tau_{\text{д}}$, сопровождающегося интенсивным нагреванием компонентов, и времени течения реакции. Так как отрезок $\tau_{\text{д}}$ значительно больше $\tau_{\text{п}}$, то количество выделяющегося углерода

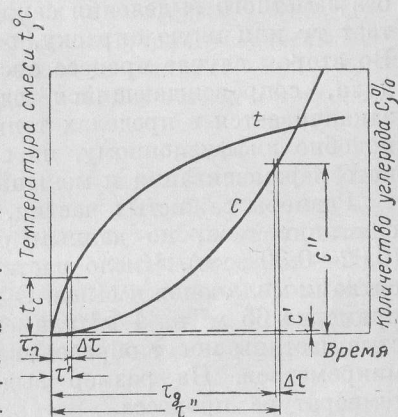


Рис. II-21. Выделение сажистого углерода в зависимости от организации сжигания природного газа.

C'' будет во много раз больше, чем C' при кинетическом горении. Это определяет возникновение сажистого факела.

Частичное предварительное смешение газа с воздухом приводит к двум характерным случаям: горение хорошо перемешанного газа с частью (50—60%) необходимого воздуха и горение плохо перемешанного газа со всем необходимым воздухом.

В первом случае воздуха в смеси оказывается достаточно для предварительного окисления углеводородов до альдегидов с последующим сгоранием их за счет подмешивания вторичного воздуха. Как было указано выше, такой процесс протекает обычно без заметного выделения сажистого углерода, но пламя приобретает ту или иную окраску, оставаясь относительно прозрачным. Во втором случае процесс смешения без участия вторичного воздуха, сопровождающийся одновременным нагреванием смеси, заканчивается в пределах топки. Такое сгорание в общих чертах подобно диффузионному, но с сокращением периода диффузионного перемешивания и меньшим выделением сажистого углерода.

Размеры сажистых частиц, выделяющихся при диффузионном сжигании газа, по данным ряда исследователей очень малы (0,02—0,30 мкм). Число частиц в 1 см³ пламени измеряется десятками миллионов и выше. Общая поверхность частиц составляет примерно 65 м² на 1 м³ пламени. В присутствии водорода сажистые частицы могут образовывать нити длиной в десятки и сотни микрометров. На размер выделяющихся частиц также влияет температура процесса.

§ II-9.

ИЗЛУЧЕНИЕ ГАЗОВОГО ФАКЕЛА

В установках, работающих на газовом топливе, большое значение имеет теплообмен за счет излучения горящего факела. В промышленных печах на долю радиации приходится до 90% передаваемого тепла. Теплообмен за счет конвекции в ряде случаев даже не учитывается. Также очень велик теплообмен излучением в топках котлоагрегатов. Поэтому весьма важно установить радиационные характеристики факела горящего газа в зависимости от организации процесса сгорания.

Теплообмен излучением в промышленных установках является результатом очень сложных явлений, протекающих одновременно: излучения высокотемпературного факела горящего газа и раскаленных поверхностей футеровки, поглощения и вторичного излучения продуктов сгорания и элементов, воспринимающих тепло. Совокупность этих явлений делает задачу расчета радиационного теплообмена в топках котлов и печей чрезвычайно сложной.

Нужно отметить, что даже теплообменные характеристики самого факела вне связи его с другими элементами топки или пламенного пространства печи изучены еще совершенно недостаточно. В этой области можно встретить много непроверенных и противоречивых данных.

Приводимые ниже краткие сведения об особенностях излучения газовых факелов не преследуют цели вооружить читателей методами расчета теплообмена в топках котлов и печей, а лишь помогут правильно понять и оценить те факторы, которые определяют радиационные характеристики факела.

Излучению в топках котлов и промышленных печах посвящено много работ, к которым и отсылаются читатели, желающие подробно ознакомиться с этими вопросами. В течение последних лет радиационные характеристики газовых факелов изучались А. В. Кавадеровым, С. Н. Шориным, В. Н. Тимофеевым, Ю. А. Суриновым и другими. Кроме того, вопросы излучения газового факела рассматривались многими зарубежными учеными.

Как известно, собственное излучение любого тела определяется законом Стефана — Больцмана:

$$E = a\sigma_0 T^4, \quad (\text{II-114})$$

где E — поверхностная плотность излучения, т. е. количество тепла, излучаемого 1 м² поверхности тела; a — степень черноты тела; σ_0 — постоянная излучения, равная $4,9 \cdot 10^{-8}$ ккал/(м²·ч·°К⁴); T — абсолютная температура излучающего тела, °К.

Для удобства закон Стефана — Больцмана обычно выражают в виде

$$E = aC_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4, \quad (\text{II-115})$$

где $C_0 = 4,9$ ккал/(м²·ч·°К⁴).

Таким образом, решающее влияние на величину радиации оказывает температура излучателя и степень его черноты.

Рассмотрим факторы, влияющие на эти важнейшие характеристики факела горящего газа. Степень черноты зависит от содержания в факеле трехатомных (и более сложных) газов и от наличия в нем твердых сажистых частиц.

В отличие от твердых тел, излучающих с исчезающе тонкого поверхностного слоя, газы излучают из всего объема. Поэтому на интенсивность их излучения влияет толщина газового слоя. Двухатомные газы практически являются теплопрозрачными, не поглощают и не излучают энергии. Из газов, содержащихся в горящем факеле, наибольшей поглощательной (следовательно, и излучательной) способностью обладают Н₂О и СО₂, а также реагирующие углеводороды и промежуточные продукты реакции. Таким образом, даже при отсутствии сажистых частиц в факеле достаточно точно учесть излучение многоатомных компонентов очень сложно из-за трудности усреднения температур и газового состава факела. Значительно проще рассчитать излучение продуктов законченного сгорания.

Излучение газов имеет прерывистый (избирательный) характер. Водяной пар поглощает и излучает лишь при длине волны

2,8 мкм, а двуокись углерода — при длине волн 2,8 и 4,4 мкм. В связи с излучением из всего объема интенсивность излучения газов снижается на некоторую величину в результате поглощения его при прохождении через толщину газа.

Эффективная степень черноты факела (топочной среды) определяется по формуле [121]

$$a_r = 1 - e^{-kps}, \quad (\text{II-116})$$

где k — коэффициент ослабления лучей топочной средой; p — давление в топке; для топок и печей, работающих при атмосферном давлении, принимается $p = 1$; s — эффективная толщина газового слоя; по [121] $s = 3,6V_T/F_{CT}$ (V_T и F_{CT} — объем и поверхность стен топочной камеры). В свою очередь,

$$k = k_r r_{п} = \left(\frac{0,78 + 1,6r_{H_2O}}{V p_{п}^s} - 0,1 \right) \left(1 - 0,37 \frac{T_T''}{1000} \right) r_{п}, \quad (\text{II-117})$$

где T_T'' — температура продуктов сгорания на выходе из топки рабочего пространства печи, °К; $r_{п} = r_{H_2O} + r_{CO_2}$ — суммарная объемная доля трехатомных газов; $p_{п}$ — суммарное парциальное давление трехатомных газов, кгс/см².

Диффузионное сжигание природных газов в светящемся непрозрачном факеле кроме излучения трехатомных газов характеризуется излучением частиц сажистого углерода. Степень их черноты зависит от размера и колеблется в очень широких пределах. Частицы размером более 20 мкм имеют степень черноты, близкую к единице, тогда как у частиц малого размера степень черноты очень незначительна. Например, при $d = 0,4$ мкм степень черноты имеет величину порядка 0,1, при меньших размерах частиц — еще меньше. Уменьшение степени черноты очень малых частиц с размерами, измеряемыми долями микрометра, объясняется тем, что эти частицы оказываются меньше длин волн, на долю которых падает большая часть энергии излучения.

Если рассматривать не отдельные частицы, а всю их совокупность, то оказывается, что наибольшую степень черноты будет иметь факел, содержащий частицы с размерами от 0,4 до 4,0 мкм, из-за большего их числа в единице объема.

Излучение факела, содержащего углеродные частицы, как и излучение газов, имеет избирательный характер. Кроме того, с уменьшением температуры факела резко снижается степень его черноты, так как максимум энергии излучения перемещается в сторону более длинных волн (закон смещения Вина) и углеродные частицы, мало «прозрачные» для коротких волн, оказываются более «прозрачными» для длинных волн, несущих максимум энергии излучения.

Сказанное иллюстрируется кривыми интенсивности излуче-

ния (рис. II-22). Если считать (в первом приближении), что сажистые частицы, размеры которых меньше длины волны излучения, не поглощают и не излучают энергии, то, например, для

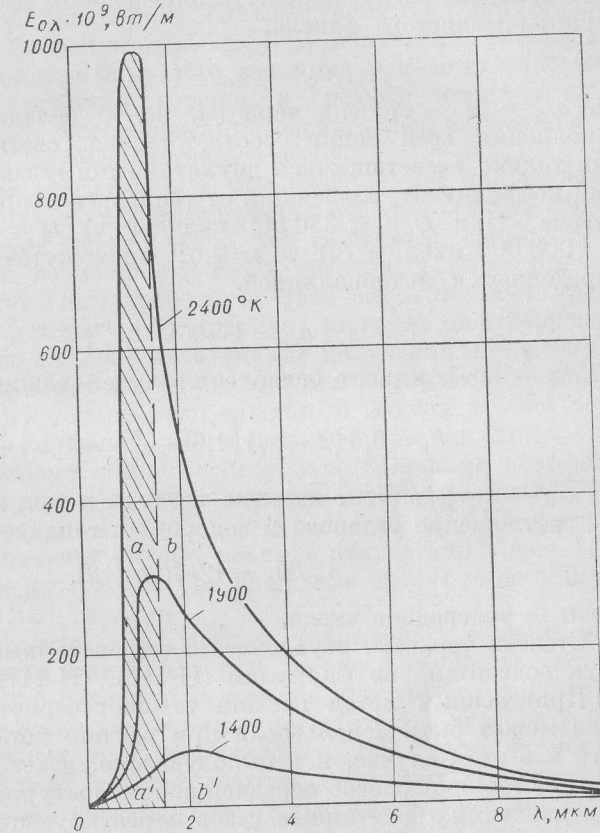


Рис. II-22. Интенсивность излучения черного тела.

частиц размером 1,5 мкм степень черноты при 2400 °К будет равна отношению площадок $a/(a + b)$, или

$$a_{св} = \frac{\int_{\lambda=1,5}^{\lambda=\infty} E_{0\lambda} d\lambda}{\int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} E_{0\lambda} d\lambda}, \quad (\text{II-118})$$

а при 1400 °К — отношению площадок $a'/(a' + b')$, или

$$a'_{св} = \frac{\int_{\lambda=1,5}^{\lambda=\infty} E'_{0\lambda} d\lambda}{\int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} E'_{0\lambda} d\lambda}.$$

Из рис. II-22 видно, что степень черноты a_{cb} одних и тех же частиц при 2400 °К заметно выше, чем при 1400 °К.

В «Нормативном методе теплового расчета котельных агрегатов» приведен следующий путь определения эффективной степени черноты сажистого факела.

$$a_{\phi} = m a_{cb} + (1 - m) a_r, \quad (\text{II-119})$$

где a_{cb} и a_r — степень черноты, какой обладал бы факел при заполнении всей топки соответственно светящимся пламенем или только несветящимися двухатомными газами; m — усредненный коэффициент, зависящий от теплового напряжения топочного объема. При $Q/V \leq 350\,000$ ккал/(м³·ч) $m = 0,1$, при $Q/V \geq 1\,000\,000$ ккал/(м³·ч) $m = 0,6$; промежуточные значения m определяются интерполяцией.

$$a_{cb} = 1 - e^{-(k+k_c)ps}, \quad (\text{II-120})$$

где k_c — коэффициент ослабления лучей сажистыми частицами.

$$k_c = 0,3 (2 - \alpha_T) \left(1,6 \frac{T_T''}{1000} - 0,5 \right) \frac{C_p}{H_p}, \quad (\text{II-121})$$

где α_T — коэффициент избытка воздуха в топке; C_p/H_p — массовое соотношение углерода и водорода в топливе.

$$C_p/H_p = 12n/(2n + 2),$$

где n — углеродное число.

Степень черноты, обусловленная трехатомными газами, может быть подсчитана по формулам (II-116), (II-117) и (II-118).

Приведенный метод расчета степени черноты сажистого факела может быть использован при расчете котельных агрегатов, хотя и в этом случае, как было указано, известную неопределенность оставляют способ осреднения температур факела, парциальных давлений трехатомных газов и реагирующих углеводородов, а также учет влияния размеров сажистых частиц.

В случае расчета степени черноты газового факела в тех или иных промышленных печах число трудноучитываемых факторов еще более возрастает.

При расчете излучения огромное значение имеет температура газового факела. При прочих равных условиях она будет зависеть от коэффициента избытка воздуха и его температуры. В случае сжигания газов с низкой теплотой сгорания (доменного, генераторного) на температуру горения большое влияние оказывает также температура газа и теплота его сгорания.

Важным фактором, влияющим на излучение, является характер распределения температур в пределах факела или в пространстве сгорания. Для одной и той же температуры продуктов сгорания, покидающих топку или печь, распределение температур может быть совершенно различным. Наибольшая радиация будет

в том случае, когда высокотемпературное ядро не изолировано от тепловоспринимающих поверхностей слоем менее нагретого газа, поглощающего излучение. Во многих случаях характер распределения температур и наличие менее нагретых потоков газа оказывают на теплообмен большее влияние, чем степень черноты факела. Указанные особенности излучения факела горящего газа приводят к тому, что величина радиации определяется не только характером горения и средним температурным уровнем, но также особенностями распределения температур и геометрическими характеристиками факела.

В литературе можно встретить утверждение, что при одинаковых тепловых нагрузках и коэффициентах избытка воздуха теплоотдача несветящегося факела выше, чем сажистого, светящегося. Не отрицая такой возможности из-за указанных выше причин, нужно заметить, что опыт работы на газе высокотемпературных печей и паровых котлов, как правило, этого не подтверждает. Так как решающее влияние на величину излучения имеет эффективная температура факела, то в отдельных случаях возможно снижение лучистого теплообмена сажистого факела за счет того, что диффузионное сгорание, обуславливающее появление сажистых частиц, протекает обычно с несколько большими коэффициентами избытка воздуха и, следовательно, при более низкой теоретической температуре горения. Из уравнения (II-115) следует, что эффект от увеличения степени черноты излучателя даже в 1,5—2,0 раза будет сведен к нулю при снижении абсолютной температуры в 1,10—1,18 раза.

Сравнительные испытания котлов, работающих с диффузионным и кинетическим сжиганием газа, нередко свидетельствовали о более интенсивной теплоотдаче в топке при диффузионном процессе, однако это имеет место лишь при равенстве коэффициентов избытка воздуха как при кинетическом, так и диффузионном сжигании природного газа. В случае сжигания генераторного или доменного газов, не дающих сажистого факела, все преимущества, очевидно, будут на стороне сжигания заранее подготовленной смеси.

Наглядно более высокая интенсивность излучения пламенного факела проявляется при газовом отоплении мартеновских печей, где осуществление сгорания в несветящемся прозрачном факеле резко снижает теплоотдачу ванне, увеличивает срок плавки и приводит к повышению температуры свода и головок регенераторов. Существующие методы расчета лучистого теплообмена не отражают особенностей температурных полей в факеле, а поэтому не могут дать надежных результатов. Нормативный метод расчета котельных агрегатов дает некоторые указания относительно определения эффективной степени черноты факела как для несветящегося, так и светящегося сажистого пламени. Следует заметить, что приравнивание светимости газового пламени к мазутному не обосновано. Обычно светимость последнего заметно выше.

§ III-1. ОСОБЕННОСТИ СЖИГАНИЯ ГАЗА В ПРОМЫШЛЕННЫХ
УСТАНОВКАХ И КЛАССИФИКАЦИЯ ГАЗОВЫХ ГОРЕЛОКГазовые горелки. Определения их основных
параметров и характеристик

Сжигание газового топлива в бытовых и промышленных установках осуществляется с помощью специальных устройств — газовых горелок. Первые конструкции газовых горелок были весьма простые. В их задачу входило создание частично или полностью перемешанной газозоудной смеси в случае условно названного нами кинетического горения или обеспечение направленной подачи в необходимых соотношениях газа и воздуха в топку при диффузионном сгорании газа. Во всех случаях в задачу топки входило обеспечение зажигания и сгорания горючей смеси. В дальнейшем конструкции горелок нередко усложнялись, так как им передавались новые дополнительные функции. Например, для обеспечения предварительного нагрева воздуха и стабилизации горения стали встраивать в горелки рекуператоры и стабилизаторы, а желание получить высокоскоростной поток продуктов сгорания привело к совмещению горелок и камеры сгорания и т. д.

Большое разнообразие конструкций газосжигающих устройств в ряде случаев не облегчает, а усложняет их выбор для той или иной огневой установки. Появляется задача выявления универсальных критериев оценки работы горелок. С целью облегчения выработки рекомендаций по применению горелочной техники, ее сокращения и нормализации целесообразно выделить собственно горелку со свойственными ей функциями и пространство сгорания или топку, независимо от ее геометрических форм и размеров.

Горелка полного предварительного смешения (кинетическая) — это устройство, обеспечивающее хорошее перемешивание газа с необходимым количеством воздуха и подающее эту смесь в пространство сгорания со скоростью, предотвращающей проскок пламени. Эти функции осуществляются в заданных пределах регулирования производительности горелки. На долю топки приходится создание условий для надежного зажигания смеси и полного выгорания горючих при любых нагрузках и нужных радиационных характеристиках факела и вторичных излучателей.

Горелка внешнего смешения (диффузионная) — это устройство, осуществляющее регулирующую и взаимно ориентированную по-

дачу газа и воздуха в топку. Задачей топки является обеспечение смесеобразования, зажигания и полного сгорания горючих при заданных радиационных характеристиках факела. Вследствие такой взаимосвязи функций нельзя изолированно оценивать и выбирать горелку, не учитывая условий протекания процесса сгорания в топке, а следует рассматривать всю систему, обеспечивающую рациональное сжигание газа.

Каждая газовая горелка рассчитывается на определенные режимные и конструктивные параметры. Согласно ГОСТ 17356—71 установлены следующие основные определения параметров и характеристик горелок.

Номинальная тепловая мощность — максимально достигнутая мощность при длительной работе горелки, химической неполноте сгорания, не превосходящей установленной нормы, и при принятом минимальном коэффициенте избытка воздуха.

Номинальные давления газа и воздуха перед горелкой — давления газа и воздуха непосредственно перед горелкой (т. е. после всех запорных и регулирующих устройств), соответствующие номинальной тепловой мощности при атмосферном давлении в камере сгорания.

Номинальная относительная длина факела — расстояние по оси факела от выходного сечения горелки, измеренное при номинальной тепловой мощности в калибрах выходного отверстия, до точки, где концентрация CO_2 при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1$ составляет 95% от максимального значения.

Коэффициент предельного регулирования горелки по тепловой мощности — отношение максимальной тепловой мощности к минимальной тепловой мощности. При этом максимальная мощность составляет 0,9 от мощности, соответствующей верхнему пределу устойчивой работы горелки, а минимальная — 1,1 от мощности, соответствующей нижнему пределу устойчивой работы горелки.

Коэффициент рабочего регулирования горелки по тепловой мощности — отношение номинальной тепловой мощности к минимальной тепловой мощности.

Удельная металлоемкость — отношение массы горелки к номинальной тепловой мощности.

Давление (разрежение) в камере сгорания — давление (разрежение) в камере сгорания в зоне выходного сечения горелки при номинальной тепловой мощности.

Шумовая характеристика горелки — уровень звукового давления, создаваемого работающей горелкой, в зависимости от спектра частот.

Классификация газовых горелок. В настоящее время существует большое число газовых горелок, имеющих различное конструктивное оформление. Это объясняется отчасти многообразием

Условные обозначения газовых признаков	Главные признаки	
	Способ подачи воздуха на горение	Номинальное давление газа и воздуха, мм вод. ст.
1	Подача воздуха за счет разрежения или конвекцией	Низкое, для газа до 500, для воздуха до 100
2	Инжекция газом воздуха	Среднее для газа, от 500 до 1000; низкое для воздуха, до 100
3	Инжекция воздухом газа	Высокое для газа, более 10 000; низкое для воздуха, до 100
4	Принудительная подача воздуха без предварительного смешения	Низкое для газа, до 500; среднее для воздуха, от 100 до 300
5	Принудительная подача воздуха с предварительным смешением	Среднее, для газа от 500 до 10 000, для воздуха от 100 до 300
6	Принудительная подача воздуха вентилятором за счет давления газа *	Высокое для газа, более 10 000; среднее для воздуха, от 100 до 300
7	То же	Низкое для газа, до 500; высокое для воздуха, более 300
8	»	Среднее для газа, от 500 до 10 000; высокое для воздуха, более 300
9	»	Высокое для газа, более 10 000; высокое для воздуха, более 300

* Энергия давления газа с помощью реактивной турбинки приводит во вращение

их назначения и в значительной степени стремлением к улучшению показателей их работы. Все существующие конструкции горелок можно подразделить на небольшое число групп, характеризующихся общими признаками. Различия между горелками в пределах этих групп определяются главным образом конструктивными решениями, способом и степенью сложности изготовления, условиями эксплуатации, а не особенностями и показателями процесса горения газа.

К сожалению, до настоящего времени нет единой четкой классификации горелок, облегчающей ориентировку в современных горелочных устройствах. Имеющиеся классификации часто не охватывают всех горелок или авторы их исходят из признаков, относящихся к совершенно различным характеристикам. Наиболее простая классификация предложена Мосгазпроектом. В ее основу положен способ подачи воздуха. Каждый класс подразделяется на горелки низкого, среднего и высокого давления. При этом не учитываются важнейшие характеристики: характер смесеобразо-

Главные признаки

Теплота сгорания газа, ккал/м ³	Номинальная тепловая мощность, Гкал/ч	Номинальная относительная длина факела, калибр	Локализация пламени
Низкая, от 800 до 4000	До 0,172	Беспламенная	Свободные факелы
Средняя, от 4000 до 7000	0,172—0,344	До 10	В огнеупорном туннеле и камере
Высокая (I группа), от 7000 до 15 000	0,344—0,688	10—16	На огнеупорной поверхности
Высокая (II группа), от 15 000 до 28 000	0,688—1,376	16—25	На металлической сетке
—	1,376—2,752	25—40	В пористой перфорированной или зернистой огнеупорной массе
—	2,752—27,52	40—63	—
—	Более 27,52	63—100	—
—	—	Более 100	—
—	—	—	—

осевой вентилятор, который нагнетает идущий на горение воздух.

вания, способ стабилизации факела и т. д. В основу классификации газовых горелок Института газа (ИГ) АН УССР [36] положена подмеченная А. Робертсоном [140] зависимость факельных процессов и теплообмена в топке от аэродинамической структуры потока на выходе из горелки и классификация Международного газового союза. По А. Робертсону характеристики факела зависят от параметра крутки и осевого количества движения потока. Все анализы даются им только для диффузионных пламен (коаксиальные системы, т. е. горелки типа «труба в трубе»). Остальная часть горелок условно относится к группе горелок предварительного смешения. В классификации Международного газового союза не всегда четко характеризуются отдельные признаки. В целом система классификации ИГ АН УССР, учитывающая энергетические и конструктивные особенности горелок, по которой каждой горелке присваивается десятизначный классификационный номер, несколько сложна для практического пользования.

Согласно ГОСТ 17357—71 устанавливаются признаки классификации горелок, работающих на искусственных, природных, смешанных и сжиженных газах. Газовые горелки классифицируются:

- 1) по способу подачи воздуха на горение;
- 2) по номинальному давлению газа и воздуха;
- 3) по теплоте сгорания газа;
- 4) по номинальной тепловой мощности;
- 5) по номинальной относительной длине факела;
- 6) по локализации пламени.

Главные признаки и их условные обозначения должны соответствовать данным табл. III-1. В зависимости от присущих горелке признаков ей дается цифровое обозначение. При этом первая цифра указывает способ подачи воздуха на горение, вторая — номинальное давление газа и воздуха, третья — теплоту сгорания газа и т. д. (см. табл. III-1). Например, инжекционная горелка среднего давления тепловой мощности около 1 Гкал/ч, в которой сжигается газ с теплотой сгорания 8500 ккал/м³, а стабилизация пламени осуществляется с помощью туннеля, имеет классификационный номер 223412. Стандарт не устанавливает классификацию газовых горелок специального назначения (сварочных, стеклодувных и др.), комбинированных горелок, в которых кроме газового применяются другие виды топлива (мазут, угольная пыль), и дополнительные средства для интенсификации процесса горения (электроэнергия, акустические колебания и др.).

В основу классификации газовых горелок могут быть положены, естественно, различные признаки. Несомненно, важнейшими из них являются вид газа и способ образования газоздушной смеси. От организации смесеобразования в значительной степени зависит характер горения. Остальные признаки обычно не являются решающими, хотя и определяют конструктивные и аэродинамические характеристики горелок и место их установки. Ниже приводится предлагаемая авторами общая классификация горелок для газового топлива.

Признак	Группа горелок
Характер смесеобразования	<ol style="list-style-type: none"> 1. Полного предварительного смешения — кинетические 2. Частичного предварительного смешения: <ol style="list-style-type: none"> а) частичного завершеного смешения; б) незавершеного смешения 3. Внешнего смешения — диффузионные 4. Диффузионно-кинетические (с регулируемой длиной и светимостью факела)
Способ подачи воздуха	<ol style="list-style-type: none"> 1. Бездутьевые 2. Инжекционные 3. Дутьевые (смесительные, двухпроводные)
Давление газа (избыточное)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Низкого давления (до 500 мм вод. ст.) 2. Среднего давления (от 0,05 до 3,0 кгс/см²)

Метод стабилизации факела

3. Высокого давления (от 3,0 кгс/см² и выше)
 1. Свободные пламена
 2. Стабилизация струями, направленными навстречу потоку
 3. Аэродинамическая стабилизация (рециркуляция продуктов сгорания за счет крутки потока)
 4. Установка плохообтекаемых тел
 5. Установка туннелей
 6. Удар в стенку или засыпка из огнеупоров
 7. Стабилизация в пористой насадке
 8. Стабилизация дежурными факелами:
 - а) питающимися от основной струи;
 - б) имеющими собственное питание
 9. Электрозажигание

Организация процесса горения и требования к газовым горелкам

Выбор типа и количества газовых горелок, их размещение и организация процесса сгорания зависят от особенностей теплового и аэродинамического режима работы промышленной установки. Правильное решение этих задач определяет интенсивность технологического процесса и экономичность установки. Теоретические предпосылки и опыт работы свидетельствуют, что при переводе на газовое топливо, а тем более при проектировании новых газовых установок основные показатели их работы, как правило, могут быть улучшены. Однако здесь следует отметить, что неправильно выбранный способ сжигания газа и неудачное расположение горелок снижают производительность и к. п. д. установок.

При проектировании промышленных газовых установок задачи интенсификации технологического процесса и повышения эффективности использования топлива должны решаться с наименьшими материальными затратами и с соблюдением ряда других условий, таких как надежность работы, безопасность и т. д. При создании некоторых специальных установок, работающих на газовом топливе, приходится сознательно ухудшать такие важнейшие с точки зрения теплотехники показатели, как полнота сгорания и к. п. д. Примером этого может служить создание в пламенных печах малоокислительной атмосферы за счет сжигания газа с недостатком воздуха. Потери топлива, имеющие при этом место, компенсируются экономией металла и средств при его дальнейшей обработке.

При сжигании природного газа в отличие от сжигания других видов топлива можно в широких пределах изменять характеристики факела. Поэтому он может быть использован практически для установок любого назначения. Здесь следует лишь помнить, что требуемая максимальная интенсификация технологического процесса, повышение к. п. д., а также удовлетворение других требований, предъявляемых к установке, не могут быть обеспечены только выбором той или иной газовой горелки, а будут достигнуты при правильном решении всего комплекса вопросов

теплообмена и аэродинамики, начиная от подачи воздуха и газа и кончая удалением отработанных продуктов горения в атмосферу. Особое значение имеет начальная стадия процесса — организация сжигания газа.

Рассмотрим некоторые встречающиеся в практике варианты требований к факелу и процессу сгорания газового топлива.

1. Необходимо сгорание в коротком прозрачном факеле в ограниченном объеме. Это достигается за счет сжигания хорошо подготовленной газозвушной смеси в кинетических горелках инжекционного или дутьевого (смесительного) типа. Стабилизация факела может осуществляться за счет установки туннеля, плохотекучего тела, огнеупорной насадки или за счет наброски и т. д. Полное сгорание газа обеспечивается при коэффициенте избытка воздуха 1,02—1,05. Тепловое напряжение топочного объема может достигать сотен мегакалорий на кубометр в час. Такие требования к факелу возникают при высокотемпературном скоростном или местном нагреве в печах, при сжигании газа в контактных и погружных теплообменниках и т. п.

2. Требуется факел умеренной длины и светимости, хорошо заполняющий топку. Необходимые условия горения достигаются при использовании горелок частичного предварительного смешения. Горелки подобного типа работают на газе низкого давления с принудительной подачей воздуха. Для того чтобы факел был укороченным и с большим углом раскрытия, можно применять горелки с закрученным потоком воздуха и смеси.

Указанные требования к факелу предъявляются в нагревательных колодцах, в некоторых установках местного нагрева и при переводе существующих котлоагрегатов на газовое отопление. В последнем случае возможно другое решение поставленной задачи: применение щелевых диффузионных горелок, подовых или настенных, также обеспечивающих хорошее заполнение топки и работу с малыми значениями коэффициента избытка воздуха при достаточной глубине регулирования.

3. Желательно сгорание в сажином светящемся факеле большой протяженности. Подобное сгорание получается с помощью диффузионных горелок, которые выбрасывают газ и воздух раздельными струями с относительно малыми скоростями. При такой организации смесеобразования и горения возможна работа с подогревом воздуха до температуры, превышающей температуру самовоспламенения.

Растянутый сажиный факел необходим в мартеновских печах, вращающихся цементных и керамзитовых печах и др.

4. Требуется такая организация сжигания газового топлива, чтобы максимально увеличить отдачу тепла за счет излучения. Это обеспечивается за счет применения радиационных горелок, в которых осуществляется сжигание хорошо подготовленной газозвушной смеси в тонком слое у керамической поверхности или в специальных огнеупорных насадках из пористой керамики,

жаростойкой металлической сетки и т. д. Подобный нагрев достигается и с помощью плоскопламенных горелок с разомкнутым факелом.

Радиационные горелки основную часть тепла передают нагреваемым изделиям за счет непосредственного излучения разогретой поверхности (керамической стенки, огнеупорной насадки и т. д.). Они используются в установках, где нужно получить заданное распределение тепловых потоков или нагрев изделий повышенной скоростью.

5. В ряде случаев, особенно при переводе на газ некоторых существующих печей и котлов (в частности, секционных, отопительных), необходимо создать примерно такие же условия в топке, как и при сжигании другого вида топлива, на котором установка успешно работала ранее. В большинстве случаев газовое топливо позволяет имитировать условия сжигания другого топлива. Например, организация сгорания в сажином диффузионном факеле позволяет получить его геометрические и теплообменные характеристики близкими к характеристикам мазутного факела. Сжигание в малосветящемся факеле в случае применения горелок частичного предварительного смешения создает условия в топке, близкие к условиям при сжигании пылевидного топлива. Наконец, применение подово-щелевых горелок в известной степени позволяет имитировать слоевой процесс горения.

Приведенные примеры не охватывают всего многообразия приемов сжигания газового топлива, а лишь подчеркивают возможность организации процесса сгорания, наиболее выгодного для заданной промышленной установки. Вопросы выбора горелочных устройств для установок конкретных типов будут рассмотрены далее. Здесь лишь отметим, что к газогорелочным устройствам предъявляются следующие основные требования:

1) конструкция должна быть по возможности компактной и простой в изготовлении, удобной, надежной и безопасной в эксплуатации, несложной в ремонте и не должна содержать элементов с пониженной стойкостью в работе;

2) горелки, работая при заданной производительности, должны обеспечить полное сжигание газа с минимальным избытком воздуха;

3) пределы регулирования горелок и характеристики факела должны удовлетворять технологическим требованиям работы газопользующей установки и во всяком случае быть не менее 1 : 3;

4) конструкция горелок должна предусматривать удобство зажигания, регулирования и возможность автоматического поддержания необходимых соотношений газа и воздуха при изменении нагрузки и режимных параметров;

5) интенсивность шума, создаваемого горелкой, не должна превышать существующих санитарных норм (85 дБ).

Как показывает практика, выбор горелки, отвечающей всем сформулированным требованиям, еще не гарантирует хорошей

и надежной работы газоиспользующей установки в целом. Необходимо правильно проектировать обвязку горелочной системы с целью равномерного распределения подачи газа и воздуха к горелкам. При этом очень важно для безопасной работы в необходимых местах устанавливать лючки и гляделки, а элементы горелок тщательно защищать от перегрева.

§ III-2.

ГОРЕЛКИ ПОЛНОГО ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО СМЕШЕНИЯ (КИНЕТИЧЕСКИЕ)

В кинетических горелках осуществляется хорошее перемешивание газа с воздухом полностью в пределах смесительной камеры, что позволяет сжигать топливо с минимальными значениями коэффициента избытка воздуха $\alpha = 1,02 \div 1,05$ и с высокими значениями объемного теплонпряжения, достигающими в ряде случаев 250—500 млн. ккал/(м³·ч). Тепловое напряжение поперечного сечения туннеля может доходить до 85 млн. ккал/(м²·ч) и выше [111]. Факел таких горелок слабосветящийся и практически невидим на фоне раскаленного огнеупора. Поэтому такое горение получило название «беспламенное». Стабилизация факела кинетических горелок осуществляется за счет установки туннелей, тел плохобтекаемой формы, огнеупорных набросок и т. д.

Недостатками кинетических горелок являются сравнительно небольшие пределы регулирования из-за возможности проскока пламени, большие размеры смесителя, значительная масса. Условия предварительного смешения не позволяют работать на воздушном дутье с температурой выше 500—600 °С, так как появляется опасность воспламенения газа в корпусе горелки в процессе смешения

В зависимости от способа приготовления смеси кинетические горелки делятся на 3 группы: дутьевые с вентиляторной подачей воздуха, инжекционные и инжекционные с принудительной подачей воздуха

Дутьевые горелки

Принудительная подача воздуха в смесительную камеру горелки применяется при недостаточном давлении газа, а также при желании сократить размеры горелки, особенно для больших расходов газа (свыше 100 м³/ч). Как показал анализ, проделанный Р. Б. Ахмедовым [8], в дутьевых горелках для сжигания газов с большой теплотой сгорания форма факела, угол его раскрытия, поля скоростей, интенсивность перемешивания в объеме сгорания зависят в основном от типа воздушного регистра и его конструктивных параметров. Способ подвода газа выбирается в зависимости от конструкции воздушного регистра. Это объясняется тем, что воздух является главным компонентом горючей смеси (около 95% по массе стехиометрической смеси).

В зависимости от способа подвода воздуха дутьевые горелки делятся на прямооточные и вихревые. В прямооточных горелках воздух к смесительной камере подводится аксиально. В этом случае на организацию структуры пламени основное влияние оказывает форма устройства выходной части горелки. Известные конструкции вихревых горелок можно подразделить на следующие типы [8]:

- 1) с простым тангенциальным подводом воздуха;
- 2) с улиточным тангенциальным;
- 3) с тангенциальным лопаточным;
- 4) с аксиальным (лопаточным);
- 5) с аксиально-тангенциальным (лопаточным).

В качестве примеров на рис. III-1 и III-2 показаны горелки с тангенциальным подводом воздуха. В горелке конструкции Ленгипроинжпроекта (см. рис. III-1), предназначенной для установки на различных агрегатах, в качестве завихряющего устройства используется воздушный короб, выполненный в виде улитки. Газ с периферии из двух рядов отверстий подается в закрученный поток воздуха. При сжигании мазута кольцевой газораспределительный коллектор предохраняется защитным кожухом, который удаляется при работе горелки на газе. Горелка обеспечивает хорошее перемешивание газа с воздухом, поэтому длина факела около 1 м [113]. Основные характеристики трех типоразмеров этой горелки приведены в табл. III-2.

ТАБЛИЦА III-2

Основные характеристики газо-мазутных горелок с улиточным тангенциальным подводом воздуха конструкции Ленгипроинжпроекта (см. рис. III-1)

Технические показатели	Типоразмер		
	I	II	III
Тепловая нагрузка горелки (P _{г. ном} = 200 мм вод. ст.), Гкал/ч	1,530	1,920	2,525
Номинальное давление воздуха, мм вод. ст.	20	35	55
Расход газа при номинальном давлении, м ³ /ч	180	225	300
Расход мазута (Q _р = 9420 ккал/кг), кг/ч	162	204	268
Количество отверстий в ряду	39	49	66
Шаг между отверстиями, мм	33,1/31,9	26,3/25,4	19,5/18,9
Диаметр амбразуры, мм:		415	
на входе		600	
на выходе			

Примечания. 1. Значения в числителе относятся к 1-му ряду отверстий, в знаменателе — к 2-му. 2. Диаметр газовых выходных отверстий 5 мм.

В СредазНИИГазе разработаны несколько конструкций газо-мазутных реверсивных горелок, позволяющих использовать на практике эффект взаимодействия вихревых пламен с целью

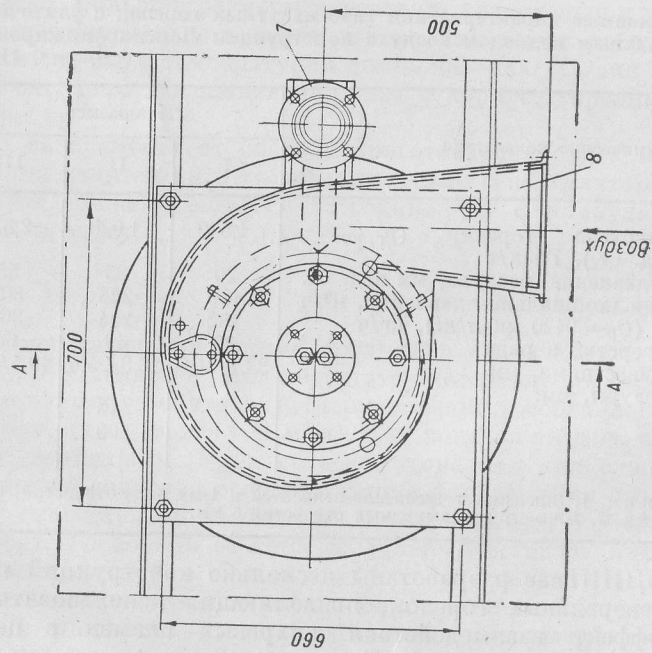


Рис. III-1. Турбулентная газо-мазутная горелка с периферийной подачей газа (см. табл. III-2).
 1 — кольцевой газораспределительный коллектор; 2 — улитка; 3 — мазутная форсунка; 4 — защитное устройство для работы на мазуте; 5 — фронтальной лист; 6 — амбразура; 7 — газовый патрубок; 8 — воздушный патрубок.

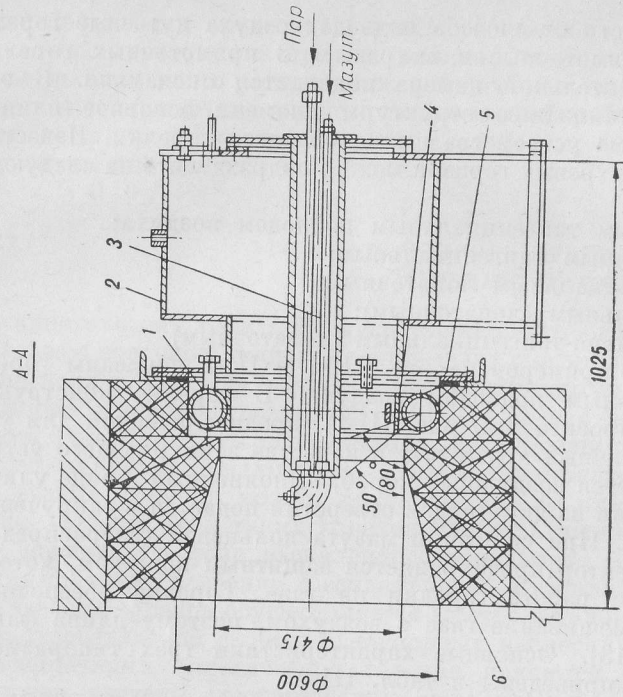


Рис. III-2. Газо-мазутная реверсивная горелка РТЛС.

1 — воздушный короб; 2 — тангенциальный лопаточный завихритель; 3 — цилиндрический шибер; 4 — привод цилиндрического шибера; 5 — центральная газовая труба; 6 — гляделка.

(см. рис. III-2), работает следующим образом. Воздух для сгорания подается из воздушного короба 1 на двухступенчатый тангенциальный лопаточный аппарат 2. Каждая из ступеней

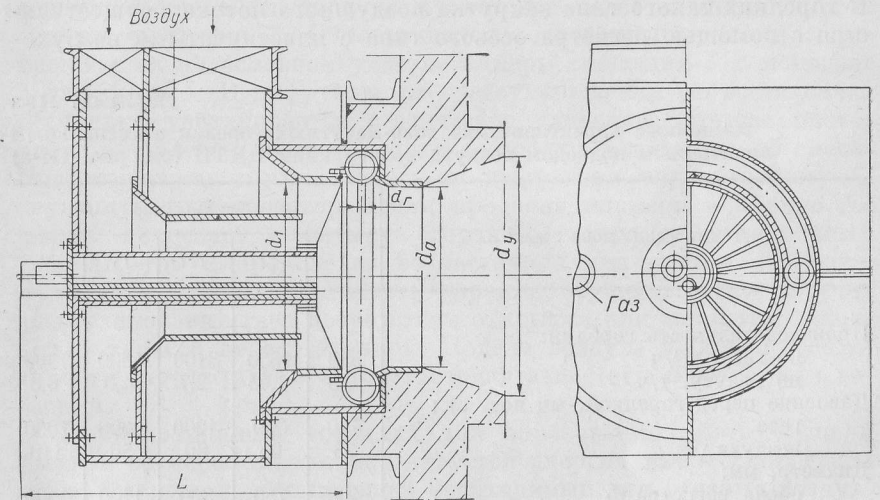


Рис. III-3. Газо-мазутная горелка ЦКТИ (см. табл. III-3)

может иметь несколько секций, в которых угол наклона лопаток один и тот же. Обе ступени выполняются зеркально по отношению друг к другу. За счет перемещения цилиндрического шибера 3 можно отключать одну из ступеней. Воздух проходит между лопатками открытой ступени и за счет тангенциального входа

выходит из горелки закрученным потоком, направление вращения которого зависит от ступени, включенной в работу. Горелка дополнительно позволяет регулировать интенсивность крутки воздушного потока за счет изменения шиберам живого сечения завихривающего устройства. Цилиндрический шиберам служит только для изменения направления вращения пламени и регулирования интенсивности крутки. Расход воздуха, поступающего на горение, регулируется с помощью специальной заслонки перед горелкой.

Реверсивные горелки за счет хорошего смесеобразования позволяют сжигать газ с $\alpha \approx 1,05$. Серия горелок типа РТЛС предназначена для сжигания от 500 до 5000 м³/ч газа. Для примера отметим, что габаритные размеры горелки производительностью 3000 м³/ч составляют 1400 × 1200 × 1400 мм.

Другая серия газо-мазутных реверсивных горелок с простым тангенциальным подводом воздуха типа РТС рассчитана на производительность от 200 до 1000 м³/ч. Эти горелки, обладающие весьма малым гидравлическим сопротивлением, позволяют сжигать газ с $\alpha = 1,03 \div 1,04$. Все горелки типов РТЛС и РТС обладают широкими пределами регулирования.

В Центральном котлотурбинном институте (ЦКТИ) им. И.И. Ползунова для агрегатов электростанций созданы газо-мазутные горелки с аксиальным лопаточным подводом воздуха (рис. III-3). В горелках такого типа закрутка воздушного потока осуществляется с помощью регистра осевого типа с пластинчатыми воздухо-

ТАБЛИЦА III-3

Основные характеристики газо-мазутных горелок с аксиальным лопаточным подводом воздуха конструкции ЦКТИ (см. рис. III-3)

Технические показатели	Типоразмер				
	I	II	III	IV	V
Производительность горелки:					
по газу, м ³ /ч	550	1650	3100	4600	7500
по мазуту, т/ч	0,5	1,45	2,7	4,0	6,5
Давление перед горелкой, мм вод. ст.:					
газа	400	600	1200	2000	7000
воздуха	75	65	80	50	110
Диаметр, мм:					
обода регистра d_1	400	750	800	1100	1100
пережима амбразуры d_a	350	640	800	1050	1050
устья амбразуры d_y	550	750	1250	1400	1400
Количество лопаток регистра			18		
Диаметр газовых отверстий d_r , мм	6/6	12/6	7/7	11/8	8/8
Количество газовых отверстий	90	30/54	180	41/82	164
Длина выступающей части горелки L , мм	870	1155	1300	1520	1520

Примечание. Значения в числителе относятся к 1-му ряду отверстий, в знаменателе — к 2-му.

направляющими лопатками. Газ выдается по периферии в глубине амбразуры через 2 ряда отверстий. При сжигании газа горелки обеспечивают отсутствие химического недожога при $\alpha = 1,05$ за пароперегревателем, а при сжигании мазута при $\alpha = 1,1$ [113]. В табл. III-3 приведены основные характеристики горелок ЦКТИ.

При эксплуатации существующих и создании новых конструкций дутьевых кинетических горелок следует иметь в виду, что неудачный выбор выходной скорости и степени крутки может привести к затягиванию факела к центральной части устья и даже в пределы смесителя горелки, вызывая нагрев и нарушение ее работы.

Инжекционные горелки

Широкое распространение для сжигания газа в нагревательных и термических печах, в топках котлов небольшой и средней мощности, сушилах и других огневых установках получили горелки с инжекционным смесителем. Одна из конструкций горелок этого типа показана на рис. III-4. Горелка работает следующим образом. Газ из подводящего газопровода поступает к соплу горелки 1, откуда вытекает с высокой скоростью, инжектируя необходимый для сгорания воздух непосредственно из атмосферы. Поступление воздуха в смеситель горелки происходит через входной участок камеры смешения 2. Образующаяся газовоздушная смесь перемешивается на основном участке камеры смешения 3 и попадает в диффузор 4. В диффузоре за счет уменьшения скорости смеси несколько увеличивается статическое давление, которое позволяет преодолевать сопротивления по тракту газовоздушной смеси. Подготовленная горючая смесь из диффузора через головку 5, служащую для предотвращения проскока пламени в корпус горелки, поступает в камеру сгорания, например огнеупорный туннель, где и происходит ее частичное или полное сгорание. Изменение производительности горелки осуществляется за счет дросселирования газа посредством открытия или закрытия запорных устройств перед горелкой. Подача воздуха в случае необходимости регулируется за счет отодвигающегося шибера или заслонки.

В инжекционных горелках для образования газовоздушной смеси и ее перемещения используется энергия высокоскоростной газовой струи, подсасывающей необходимый для горения воздух. Это значит, что данные горелки могут успешно работать без вентилятора, подающего воздух, даже при небольших противодавлениях в пространстве сгорания. В инжекционных смесителях осуществляется весьма хорошее перемешивание газа с воздухом, что обеспечивает полное сгорание при минимальных коэффициентах избытка воздуха $\alpha = 1,03 \div 1,05$, которые при определенных условиях мало меняются даже при значительных колебаниях нагрузки горелки.

Инжекционные горелки по сравнению с дутьевыми не нуждаются в автоматике пропорционирования газа и воздуха, а также в устройстве, отключающем подачу газа в случае прекращения подачи воздуха.

Инжекционные горелки имеют ряд недостатков. Основные из них — большая длина горелок обычного типа (осесимметричных) даже при производительностях в пределах 60—100 м³/ч и недостаточная глубина регулирования из-за опасности проскока пламени

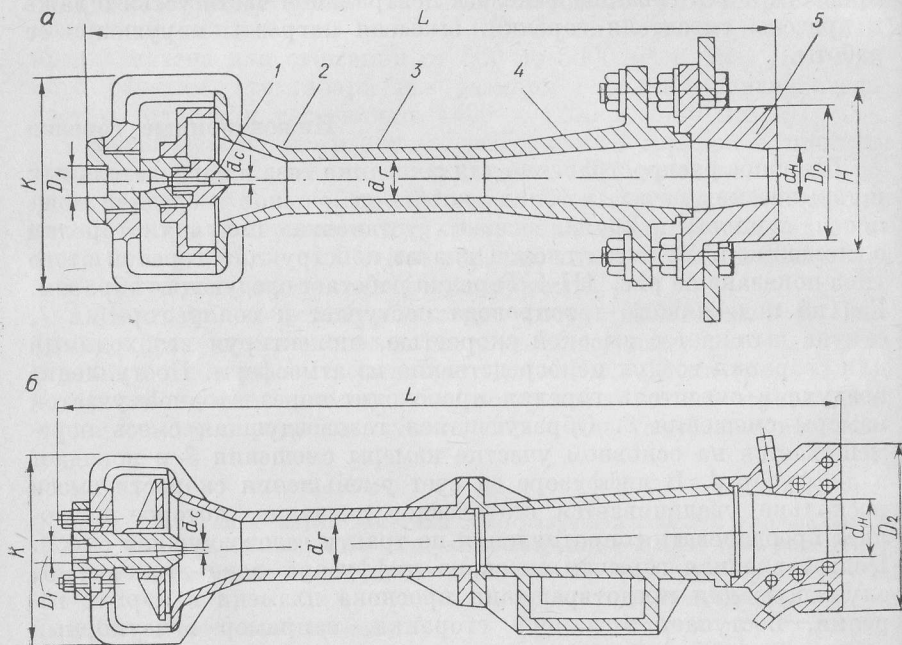


Рис. III-4. Инжекционные горелки типа В конструкции Стальпроекта (см. табл. III-4).
а — без охлаждения насадка; б — с водоохлаждаемым насадком.

в смеситель при снижении нагрузки. Последнее объясняется тем, что инжекционный смеситель, как и всякий струйный прибор, обладающий низким к. п. д., не позволяет создавать достаточно большие выходные скорости смеси. По этой причине инжекционные горелки низкого давления получили очень ограниченное применение в промышленности, особенно при наличии в пространстве сгорания некоторого противодействия.

Сравнительно строгое пропорционирование соотношения газа и воздуха в инжекционных горелках возможно только при нулевом давлении в топке. При наличии разрежения или противодействия в топке саморегулируемость в подаче воздуха нарушается, и это отклонение тем выше, чем выше разрежение или противодействие в камере сгорания. В установках с противодействием

выше 4—5 мм вод. ст. использование инжекционных горелок не целесообразно.

Нормальная работа инжекционных горелок полного предварительного смешения на холодном воздухе может быть обеспечена при давлении газа не ниже 2000—3000 мм вод. ст., а при сжигании попутных газов — даже еще выше. Случаи успешной работы инжекционных горелок при меньших давлениях наблюдаются при значительных разрежениях в топке или малой глубине регулирования, т. е. ограниченной возможности снижения нагрузки.

ТАБЛИЦА III-4
Основные характеристики инжекционных горелок конструкции Стальпроекта для природного газа (см. рис. III-4)

Типоразмер	Тепловая мощность горелки, Мкал/ч	Расход газа, м ³ /ч	Размеры, мм						Масса, кг
			D ₁ (дюйм)	D ₂	d _Г	K	L	H×H	
V 15/1,0	6,2	0,7	1/2	60	12,0	110	220	80×80	5,1
V 18/1,2	9,2	1,1	1/2	60	14,5	110	250	80×80	5,3
V 21/1,4	12,5	1,5	1/2	60	17,0	110	275	80×80	5,6
V 24/1,6	15,7	1,9	1/2	80	19,0	135	300	100×100	8,8
V 28/1,8	21,8	2,6	1/2	80	22,5	135	335	100×100	9,0
V 32/2,1	27,5	3,3	1/2	80	25,5	135	375	100×100	9,8
V 37/2,4	37,6	4,5	1/2	100	30,0	165	440	120×120	14,3
V 42/2,7	48,8	5,9	1/2	100	33,5	165	490	120×120	14,8
V 48/3,1	63,5	7,6	1/2	120	38,5	165	545	140×140	21,0
V 56/3,6	85,3	10,2	3/4	120	45,0	215	625	140×140	26,0
V 65/4,2	118,0	14,1	3/4	140	52,0	215	700	170×170	33,5
V 75/4,8	156,0	18,7	3/4	140	60,0	215	800	170×170	35,2
V 86/5,5	206,0	24,7	1	220	69,0	285	960	—	58,7
V 100/6,4	272,0	32,6	1	260	80,0	285	1095	—	81,0
V 116/7,5	380,0	45,5	1 1/4	300	93,0	330	1240	—	107,0
V 134/8,6	490,0	58,7	1 1/4	350	107,0	360	1420	—	151,0
V 154/9,9	645,0	77,3	1 1/2	410	123,0	410	1615	—	216,0
V 178/11,4	862,0	103,2	1 1/2	470	142,0	475	1840	—	240,0
V 205/13,2	1140,0	136,5	2	490	164,0	555	2130	—	342,0
V 235/15,1	1510,0	181,0	2	510	188,0	605	2400	—	401,0

Примечания. 1. Теплота сгорания газа $Q_{н,р} = 8350$ ккал/м³; расчетный коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1,05$. 2. Тепловая мощность горелки и расход газа даны при давлении газа $p_{Г} = 5000$ мм вод. ст. 3. Индекс «В», указанный в типоразмерах горелок, означает, что горелка предназначена для сжигания газов с высокой плотной сгорания, а дробными цифрами обозначены диаметры (мм) носика $d_{н}$ и сопла горелки $d_{с}$.

Низкое давление газа может обеспечить лишь работу инжекционных горелок с частичным предварительным смешением (атмосферного типа). В подобных горелках осуществляется хорошее перемешивание газа с 50—60% необходимого для сгорания воздуха. Недостающее количество воздуха подается к корню факела

за счет разрежения в топке. В случае работы инжекционных горелок на подогретом воздухе минимально необходимое давление газа может превышать 2—3 кгс/см², так как при этом из-за дополнительного сопротивления рекуператора и необходимости увеличения выходной скорости смеси резко увеличивается сопротивление тракта воздух — смесь. Поэтому инжекционные горелки, предназначенные для работы на природном газе, не применяются на установках с рекуперативным подогревом воздуха.

Рассмотрим наиболее характерные конструкции инжекционных горелок, получивших достаточную известность и распространение. Горелки конструкции Стальпроекта (см. рис. III-4) предназначены для сжигания газа в нагревательных и термических печах металлургических и машиностроительных предприятий. Нормализованный ряд горелок для сжигания газов с высокой теплотой сгорания насчитывает 20 типоразмеров с диаметром выходной части головки («носика») d_n от 15 до 235 мм. Каждые 2 соседние горелки в ряду отличаются друг от друга по тепловой мощности на 25%. Расчетное давление газа от 1000 до 14 000 мм вод. ст. Горелки с d_n более 75 мм (см. рис. III-4, б) выполняются с обязательным водяным охлаждением головки. Все горелки имеют литой разъемный корпус с опорной частью для крепления. В табл. III-4 приведены основные размеры и характеристики горелок Стальпроекта.

К недостаткам рассмотренных горелок следует отнести их сравнительно небольшие пределы регулирования, необходимость водяного охлаждения головки при небольших производительностях и значительные продольные размеры, характерные для всех односплошных горелок.

Горелки конструкции Мосгазпроекта типа ИГК, с пластинчатыми стабилизаторами, показаны на рис. III-5. Оригинальным элементом этих горелок является установка на выходе из диффузора пластинчатых стабилизаторов. Стабилизатор представляет собою пакет стальных пластин с расстоянием между ними 1,5 мм. Малое расстояние между пластинами, охлаждаемыми потоком смеси, предотвращает проскок пламени. Наличие зон рециркуляции за шайбами на стяжных болтах обеспечивает поджигание смеси и не допускает отрыва пламени. Горелки с пластинчатыми стабилизаторами устойчиво работают при изменении давления газа от 0,03 до 0,5 кгс/см².

Нормальная работа горелок на тепловых агрегатах возможна только при наличии в топке разрежения от 0,5 мм вод. ст. и выше. Противодавление в топке приводит к перегреву и деформации пластин стабилизаторов и к выходу их из строя. При остановке горелки воздушная шайба должна быть всегда открытой, чтобы просасываемый через смеситель за счет разрежения в топке воздух охлаждал пластины. В противном случае излучение из топки вызывает перегрев и деформацию пластин. Горелки типа ИГК не рекомендуется применять для высокотемпературных топок (печей).

В настоящее время в Мосгазпроекте проведена работа по модернизации горелок типа ИГК для приведения их индексов в соответствие с действительной номинальной производительностью по газу, а также для некоторого сокращения длины смесителя и повышения технологичности [91]. С этой целью горелки производительностью 50 м³/ч и выше снабжены четырехсопловым аппаратом. Модернизированные горелки ИГК-М при номинальном давлении газа 3000 мм вод. ст. имеют производительность 6, 25, 50, 100 и 150 м³/ч. Горелки ИГК-25 производительностью 15 м³/ч и ИГК-60 производительностью 35 м³/ч остались в старом исполнении и получили наименование соответственно ИГК-1-15 и ИГК-1-35.

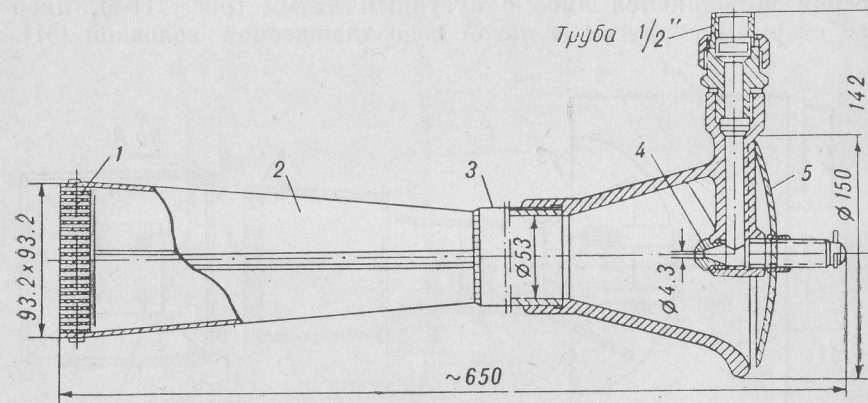


Рис. III-5. Инжекционная горелка с пластинчатым стабилизатором ИГК-1-25М.

1 — пластинчатый стабилизатор горения; 2 — диффузор; 3 — камера смешения; 4 — сопло; 5 — регулятор воздуха.

Горелки ИГК-4-50М, ИГК-4-100М и ИГК-4-150М (рис. III-6) заменяют соответственно горелки ИГК-120, ИГК-170 и ИГК-250. Горелка ИГК-1-6М отличается от других горелок серии конструкцией стабилизатора горения, который выполнен в виде обратного конуса со сквозным осевым отверстием для охлаждения.

При работе инжекционных горелок неизбежно возникает характерный шум, зависящий от перепада давления газа и степени открытия воздушного шибера. В горелке, показанной на рис. III-6, для уменьшения шума установлен регулятор подачи воздуха сложной формы с внутренней отделкой войлоком. Однако глушители такой конструкции ухудшают аэродинамику горелки, так как служат дополнительным сопротивлением на воздушном тракте.

Основные характеристики существующих и модернизированных горелок типа ИГК, работающих на природном газе с теплотой сгорания 8500 ккал/м³ и плотностью 0,73 кг/м³ при расчетном коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1,05$, приведены в табл. III-5.

Горелки конструкции Куйбышевского политехнического института (КПТИ) имеют плоский многосопловый инжектор. Такая

конструкция позволяет (как и в горелках ЗИЛ) уменьшить эквивалентный диаметр выходного сечения и значительно сократить длину горелки. Разработаны 2 серии плоских горелок. Одна серия состоит из горелок четырех типоразмеров производительностью 50, 75, 100 и 150 м³/ч (тепловая мощность 0,425; 0,638; 0,85 и 1,275 Гкал/ч). Горелки имеют литой чугунный корпус (рис. III-7) и работают без искусственного охлаждения головки (см. табл. III-6). Вторая серия горелок, рассчитанная на давление газа 0,65 кгс/см², состоит из трех типоразмеров производительностью 300, 500 и 1000 м³/ч (тепловая мощность соответственно 2,55; 4,25 и 8,5 Гкал/ч). Горелки этой серии выполняются либо с чугунным литым (рис. III-8), либо со сварным корпусом и литой водоохлаждаемой головкой [81].

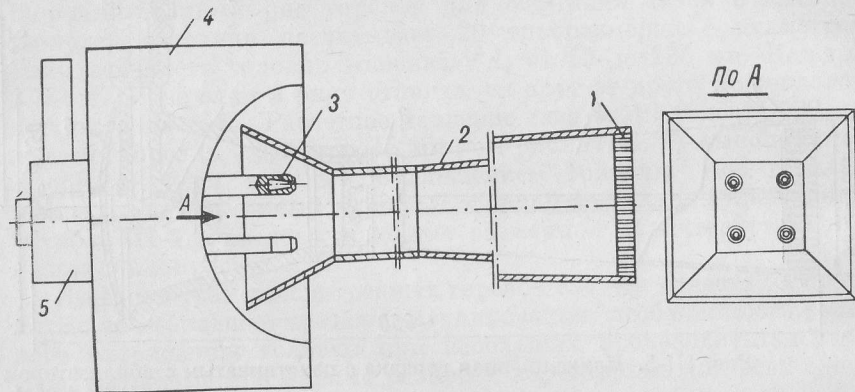


Рис. III-6. Конструктивная схема инжекционных горелок ИГК-4-50М, ИГК-4-100М и ИГК-4-150М (см. табл. III-5).
1 — стабилизатор; 2 — смеситель; 3 — сопло; 4 — глушитель; 5 — газовая камера.

Литые корпуса позволили улучшить конструкцию и аэродинамику горелок, но при этом масса горелок увеличилась примерно в 1,5 раза. Представляется выгодным выполнение корпуса штампованным и свариваемым из двух половинок.

Во время работы горелок газ поступает в специальный сопловой коллектор и вытекает в виде ряда параллельных струй. Выходящие струи инжектируют воздух, поступающий в камеру всасывания. Регулирование подачи воздуха производится взаимосвязанными воздушными заслонками, а изменение производительности — газовой задвижкой. Основные характеристики горелок приводятся в табл. III-6. Рассчитаны горелки на сжигание природного газа с теплотой сгорания 8500 ккал/м³ и плотностью $\rho_{ог} = 0,75$ кг/м³, но могут быть использованы для сжигания газов с иными характеристиками. При этом для сохранения тепловой мощности и коэффициента избытка воздуха горелок необходимо изменить диаметры сопловых отверстий и давление газа.

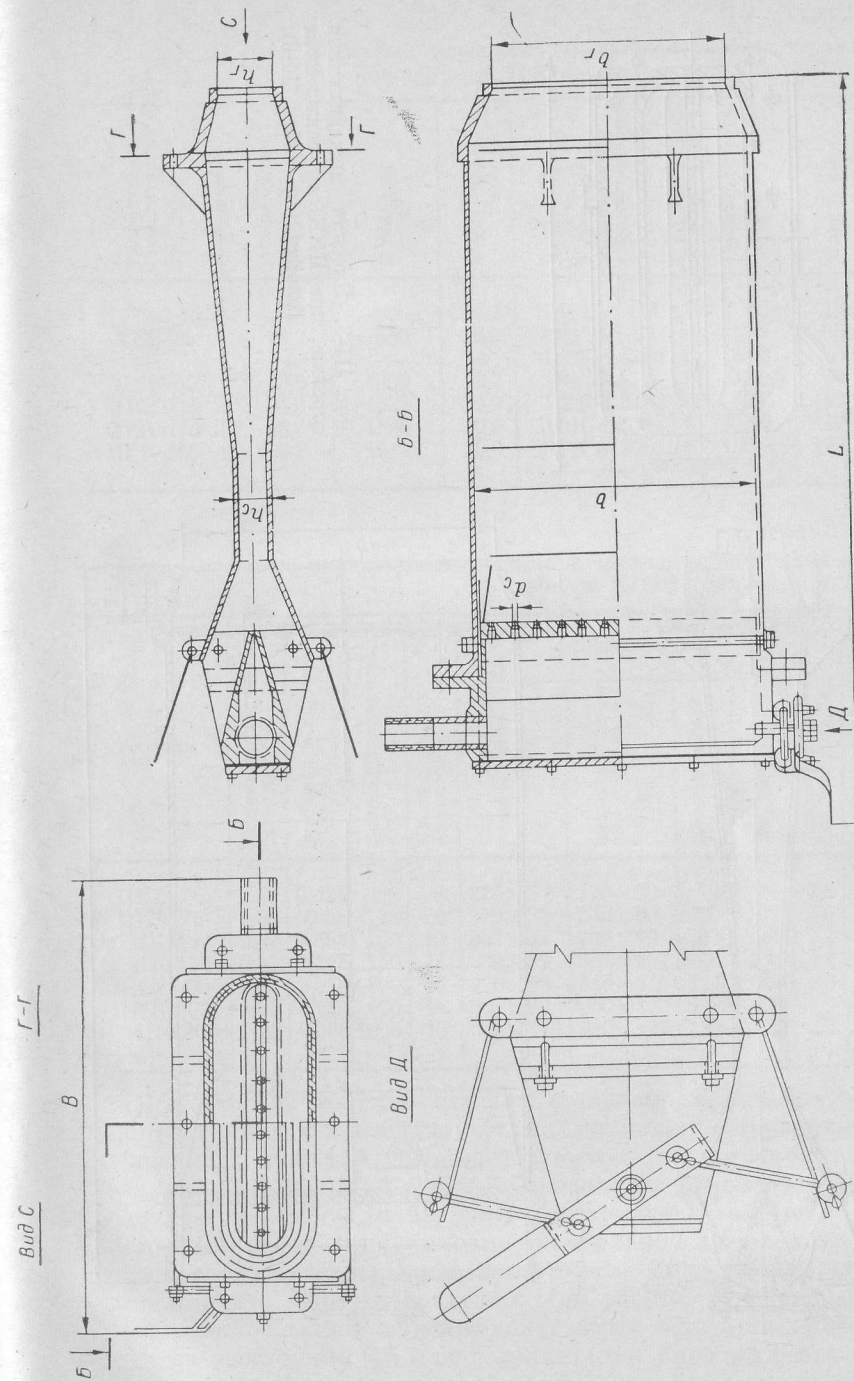


Рис. III-7. Плоская многосопловая инжекционная горелка типа ПИК без искусственного охлаждения головки (см. табл. III-6).

ТАБЛИЦА III-5

Основные характеристики инжекционных горелок ИГК конструкции Мосгазпроекта (см. рис. III-5 и III-6)

Типоразмеры существующих горелок	Производительность, м ³ /ч	Длина, мм	Масса, кг	Типоразмеры модернизированных горелок	Производительность, м ³ /ч	Длина, мм	Масса, кг
ИГК-2-10	5,0	860	4,2	ИГК-1-6М	6,0	453	2,0
ИГК-25	14,2	650	6,5	ИГК-1-15	14,2	650	6,5
—	—	—	—	ИГК-1-25М	25,0	700	7,1
ИГК-60	33,8	1000	12,2	ИГК-1-35	33,8	1000	12,2
ИГК-120	64,0	1327	29,0	ИГК-4-50М	50,0	1180	15,5
ИГК-170	88,0	1596	40,0	ИГК-4-100М	100,0	1472	35,0
ИГК-250	133,0	1914	50,0	ИГК-4-150М	150,0	1935	47,0

ТАБЛИЦА III-6

Основные характеристики плоских многосопловых инжекционных горелок КПиИ (см. рис. III-7 и III-8)

Тип горелки	Номинальное давление газа, кгс/см ²	Тепловая мощность, Гкал/ч	Производительность, м ³ /ч	Число сопловых отверстий n	Размеры, мм					Расход охлаждающей воды, кг/ч	Масса, кг
					камеры смешения $b \times h_c$	выходного сечения головки $b_1 \times h_p$	Полная длина L	Ширина B	Диаметр сопловых отверстий d_c		
КПиИ-50	0,40	0,425	50	8	225×30	195×50	720	360	2,8	—	34,5
КПиИ-75	0,40	0,638	75	10	270×36	230×60	900	370	3,0	—	42,5
КПиИ-100	0,40	0,850	100	12	322×42	280×70	930	456	3,2	—	51,5
КПиИ-150	0,40	1,275	150	14	389×52	363×80	1060	524	3,6	—	74,5
КПиИ-300	0,65	2,550	300	12	470×70	416×115	1248	610	5,0	200	100,0
КПиИ-500	0,65	4,250	500	14	685×80	630×125	1495	830	6,0	280	141,5
КПиИ-1000	0,65	8,500	1000	15	915×120	835×190	1980	1170	8,2	350	260,0

Все плоские горелки прошли стендовые испытания, опытно-промышленную и длительную эксплуатационную проверку на промышленных котлах. Они обеспечивают экономичное сжигание газа, так как работают с минимальными коэффициентами избытка воздуха $\alpha = 1,02 \div 1,05$ без химического недожога. При изменении нагрузки горелок (при условии правильной начальной регулировки) обеспечивается достаточно строгое поддержание заданного коэффициента избытка воздуха. При работе горелок возникает шум, однако не превышающий допустимых санитарных норм (85 дБ) даже на расстоянии 0,5 м от горелки [81]. Горелки без водоохла-

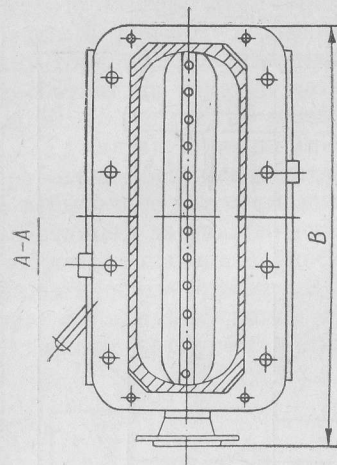
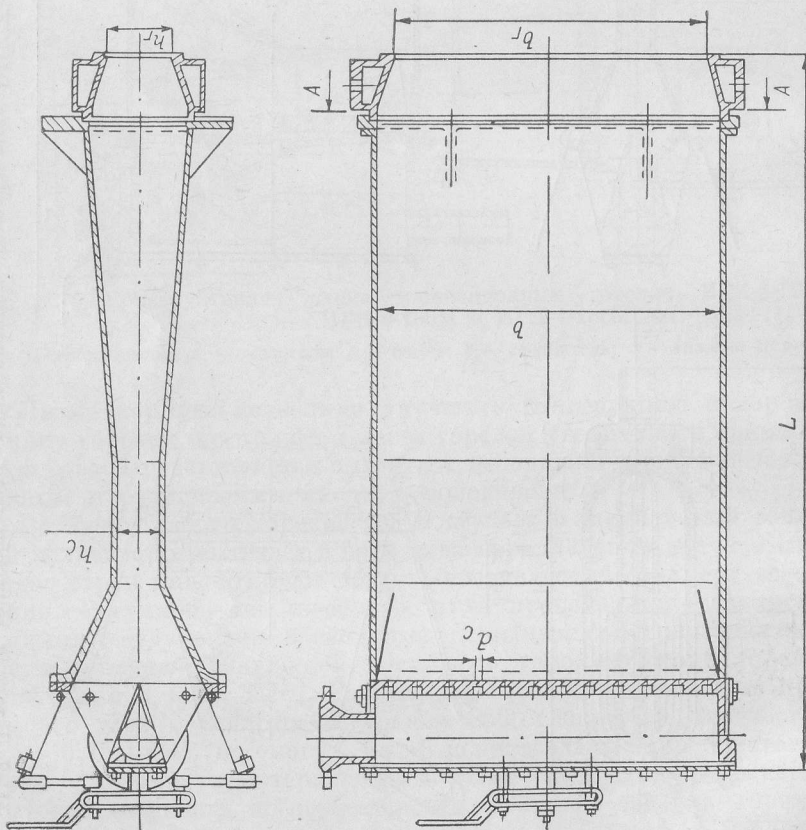


Рис. III-8. Плоская инжекционная горелка типа ПИК с охлаждением головки (см. табл. III-6).



ждаемых головок устойчиво работают без проскока пламени при снижении нагрузки до 35% от номинальной, а горелки с водоохлаждаемой головкой позволяют снижать нагрузки до 25% от номинальной.

Горелки малой производительности (до 150 м³/ч) предназначены для сжигания газа в ряде типов промышленных котлов производительностью до 4—6 т/ч, в кузнечных нагревательных и термических печах и сушилах различного назначения при наличии в топке противодействия не более 1,5 мм вод. ст. Более мощные горелки (от 300 до 1000 м³/ч) рекомендуются для сжигания газа в промышленных котлоагрегатах производительностью свыше 4 т/ч. Особенно эффективно применение этих горелок на котлах с высокой степенью экранирования (типа ДКВ, ДКВР, ВВД, КРШ и др.). Они могут также быть установлены на крупных промышленных печах, работающих без подогрева воздуха и с противодействием в топке не более 1—1,5 мм вод. ст.

Все известные конструкции плоских инжекционных горелок имеют ряд газовых сопел или сопловых отверстий, оси которых параллельны между собой и расположены в плоскости симметрии горелки. Такая конструкция приводит к некоторой неравномерности распределения газа и скоростей на выходе из смесителя, что несколько ухудшает условия сгорания смеси и снижает пределы регулирования производительности горелки.

В КПТИ сконструирована плоскофакельная инжекционная горелка с клиновидным стабилизатором горения производительностью 500 м³/ч [52]. Все сопла ее (рис. III-9) выполняются с отклонением поочередно в обе стороны от плоскости симметрии на угол, равный $1/4 \delta$, т. е. $1/4$ центрального угла раскрытия диффузора, с целью более равномерного заполнения камеры смешения развивающимися струями газа. Благодаря этому процессы перемешивания и выравнивания скоростей в камере смешения и диффузоре протекают значительно интенсивнее, чем в существующих плоских горелках, что обеспечивает возможность работы с меньшим коэффициентом избытка воздуха и большей глубиной регулирования. Для завершения смешения требуется меньшая длина смесителя [52].

Горелки с периферийной раздачей газа, разработанные в КПТИ, Ленинградском научно-исследовательском институте Академии коммунального хозяйства им. К. Д. Памфилова (ЛНИИ АКХ), Ленгипроинжпроекте, Промэнергогазе [81, 69, 130], имеют достаточно равномерные поля скоростей и концентраций в выходном сечении даже без специальной головки и при сравнительно коротких камерах смешения. Небольшие смесители с периферийной раздачей газа можно легко объединять в блоки или секции с общим газовым коллектором. На рис. III-10 показана секция готовой инжекционной горелки с периферийной подачей газа [130]. Горелка состоит из ряда смесителей с общим газовым коллектором. Каждый смеситель представляет собой цилиндрическую камеру

с соплами, просверленными в стенке под углом 18—20° к оси горелки. Горелки располагаются в кладке топочной камеры установки. Смесители удобны в эксплуатации; розжиг их осуще-

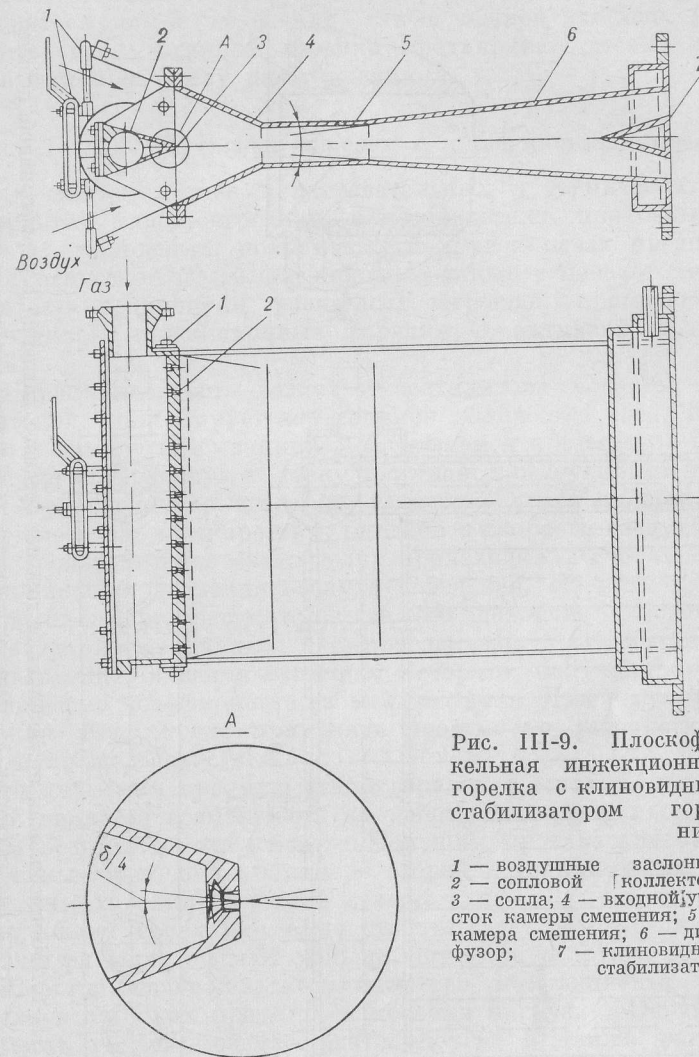


Рис. III-9. Плоскофакельная инжекционная горелка с клиновидным стабилизатором горения.

1 — воздушные заслонки; 2 — сопловой коллектор; 3 — сопла; 4 — входной участок камеры смешения; 5 — камера смешения; 6 — диффузор; 7 — клиновидный стабилизатор.

ствляется из входной части камеры смешения, а возможный проскок легко устраняется без отключения горелки только за счет увеличения скорости выхода смеси (увеличения нагрузки).

Отдельные смесители блочных горелок, подобные изображенным на рис. III-10, имеют небольшую производительность (2—3 м³/ч). В КПТИ отработаны смесители с единичной производительностью

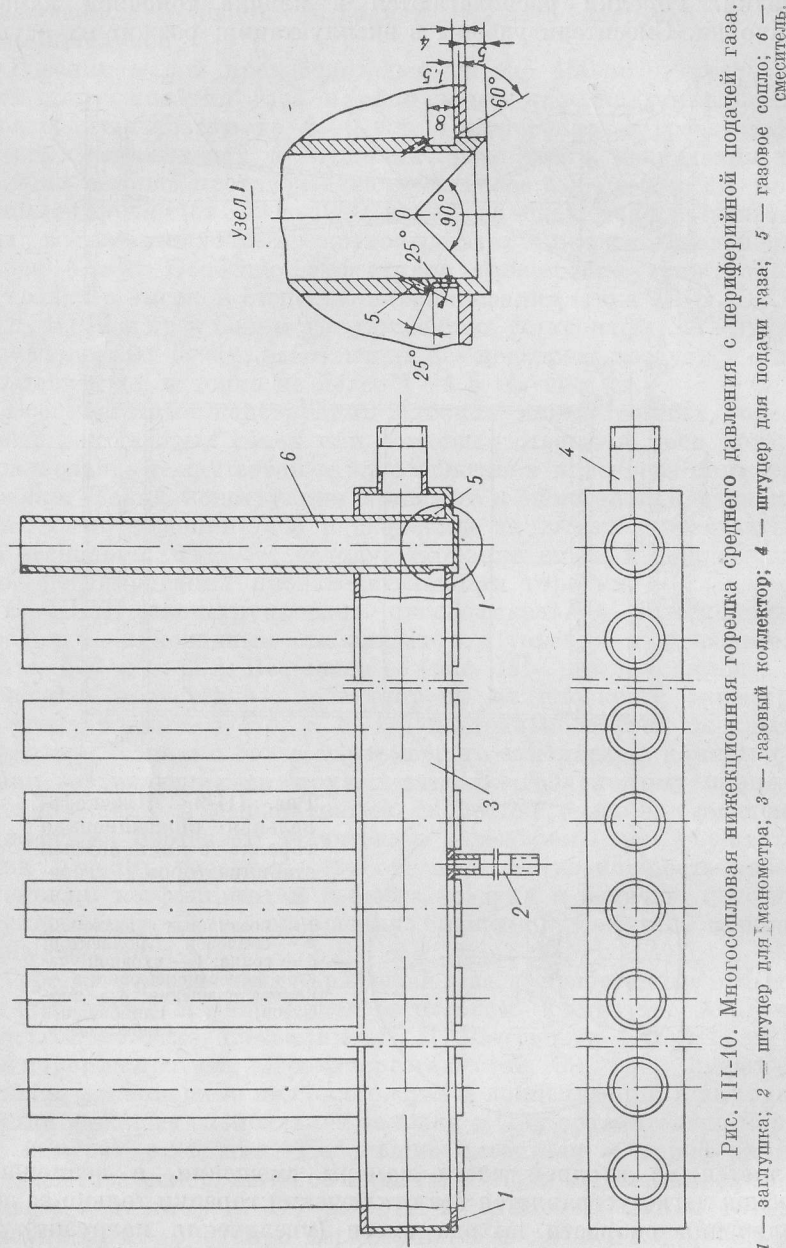


Рис. III-10. Многосопловая инжекционная горелка среднего давления с периферийной подачей газа.
 1 — заглушка; 2 — штуцер для манометра; 3 — газовый коллектор; 4 — штуцер для подачи газа; 5 — газовое сопло; 6 — смеситель.

до $80 \text{ м}^3/\text{ч}$. Однако следует иметь в виду, что с увеличением единичной производительности смесителя (калибра горелки d) уменьшаются пределы их регулирования.

Инжекционные горелки с периферийной раздачей газа могут применяться как в котельной, так и печной технике. Следует заметить, что указанные горелки предъявляют весьма высокие требования к качеству изготовления.

Дутьевые горелки с инжекционным смесителем

Для сжигания газа в нагревательных и термических печах предприятий машиностроения, в методических, проходных, конвейерных, кольцевых, колпаковых и других печах предприятий металлургической промышленности, а также в печах и тепловых агрегатах предприятий различных отраслей промышленности перспективны инжекционные горелки с активной воздушной струей.

Во время их работы воздух от вентилятора подается к соплу и, вытекая, инжектирует необходимое количество газа, поступающего в камеру всасывания. Образующаяся в смесителе горючая смесь через горелочную головку поступает в огнеупорный туннель, где и происходит ее сгорание. Отметим, что возможна подача газа в смеситель со скоростью, близкой к скорости воздуха. Изменение производительности горелки происходит за счет повышения или понижения давления воздуха перед ней. На пути к горелке газ проходит через регулятор, где его давление снижается до определенной величины, и преодолевает стабилизирующее сопротивление, изменяя величину которого получают необходимое значение коэффициента избытка воздуха. Для регулирования давления газа можно применять простые по устройству регуляторы прямого действия.

Существенным преимуществом горелок с активной воздушной струей является возможность их работы на холодном или подогретом воздухе в установках с большим противодавлением или переменным давлением в камере сгорания (например, вагранки, погружные горелки, шахтные печи и т. п.). По сравнению с инжекционными горелками обычного типа данные горелки имеют меньшие размеры, издают меньший шум при работе и сохраняют способность поддерживать постоянство коэффициента избытка воздуха в широких пределах изменения нагрузки. Однако необходимость подачи воздуха вентилятором, а также регулятора давления газа, являющегося составным элементом горелки, несколько усложняет монтаж и эксплуатацию.

На рис. III-11 показаны дутьевые горелки с инжекционным смесителем, созданные в КПТИ [83]. Разработанная серия горелок имеет 6 типоразмеров, соответствующих тепловой мощности: 80, 120, 200, 400, 600 и 800 Мкал/ч . При сжигании газа с теплотой сгорания $Q_{p.н} = 8000 \text{ ккал/м}^3$ это соответствует производитель-

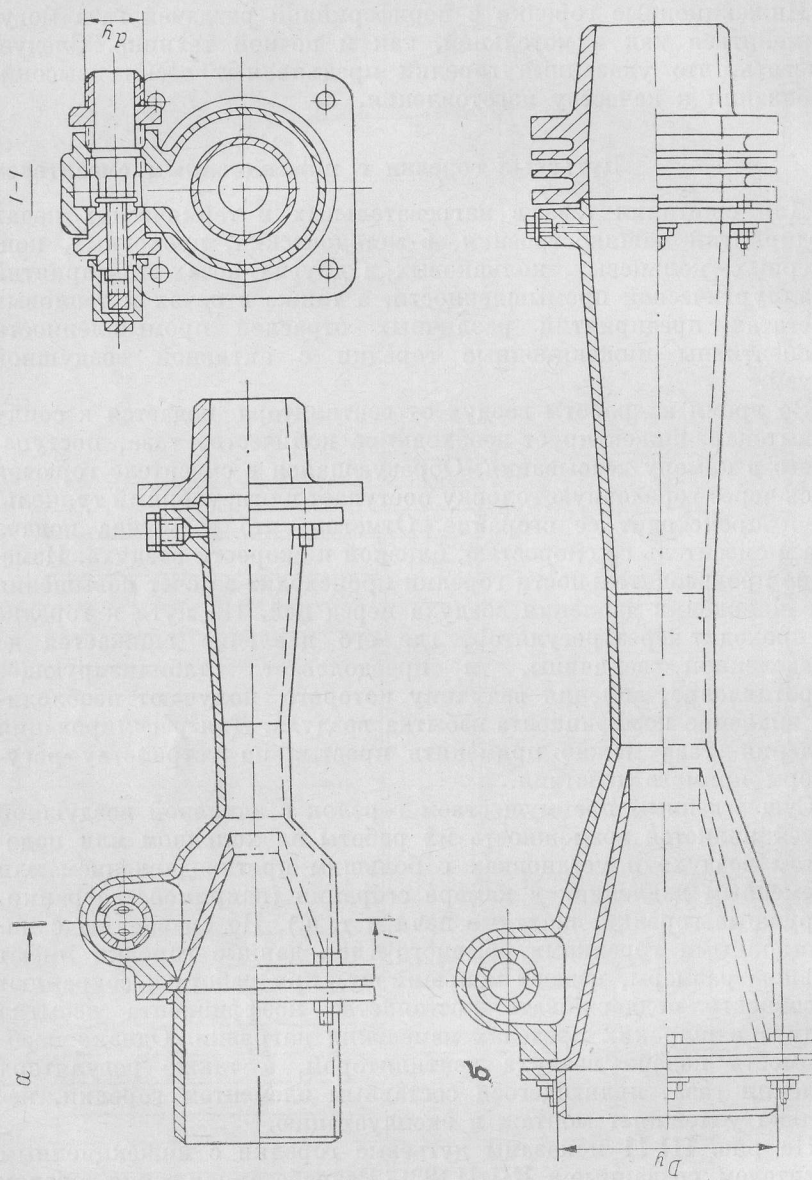


Рис. III-14. Дутьевые горелки с инжекционным смесителем (см. табл. III-7) мощностью до 400 (а) и до 800 (б) Мкал/ч.

ности 10, 15, 25, 50, 75 и 100 м³/ч. Встроенным в корпус регулировочным клапаном горелки можно настраивать для сжигания газов с различной теплотой сгорания.

Если горелки работают на холодном воздухе без противодействия в камере сгорания, то расчетная тепловая мощность обеспечивается при давлении воздуха перед соплом около 150 мм вод. ст. Как величина стабилизирующего сопротивления, так и необходимое давление воздуха должны определяться расчетом. Основные характеристики горелок, работающих на холодном воздухе с давлением перед горелкой 150 мм вод. ст., приведены в табл. III-7.

ТАБЛИЦА III-7

Основные характеристики дутьевых горелок с инжекционным смесителем конструкции КИТИ (см. рис. III-14)

Тепловая мощность горелок, Мкал/ч	Диаметр воздушного патрубка D_y , мм	Диаметр газового патрубка d_y , мм	Длина горелки, мм	Тип регулятора
80	70	25	310	РС-32
120	80	25	350	РС-32
200	100	25	445	РС-40
400	125	32	570	РС-40
600	180	50	835	РС-50
800	210	50	975	РС-50

Описанные конструкции горелок не обеспечивают полностью необходимое качество подготовки газозвушной смеси. Для улучшения условий смешения ввод газа в смеситель можно осуществлять через ряд сопел или, как это показано на рис. III-12, через специальное многоструйное сопло. В этом случае появляется возможность сократить длину смесителя. Заметного сокращения длины горелки можно добиться, выполнив ее смеситель в виде плоскосимметричной конструкции. Опытные образцы таких горелок тепловой мощностью 860 Мкал/ч разработаны и успешно прошли испытания в КИТИ.

Как указывалось, для дутьевых горелок с инжекционным смесителем характерно наличие регулятора соотношения. Подробный анализ конструкций таких регуляторов, рекомендации по их выбору, реконструкции и расчету приводятся в работе [83]. Для описанных здесь горелок (см. рис. III-11, III-12) авторы рекомендуют регуляторы соотношения РС (рис. III-13), которые для унификации отдельных узлов и деталей созданы на базе серийно изготавливаемых регуляторов давления РД-32М и РД-50М конструкции Мосгазпроекта. Клапан регулятора и его привод оставлены без изменений. Пружина заменена более слабой, уравновешивающей в основном вес (силу тяжести) подвижной системы. Некоторые изменения внесены в коробку мембранного привода. Задающий импульс для регулятора — давление воздуха —

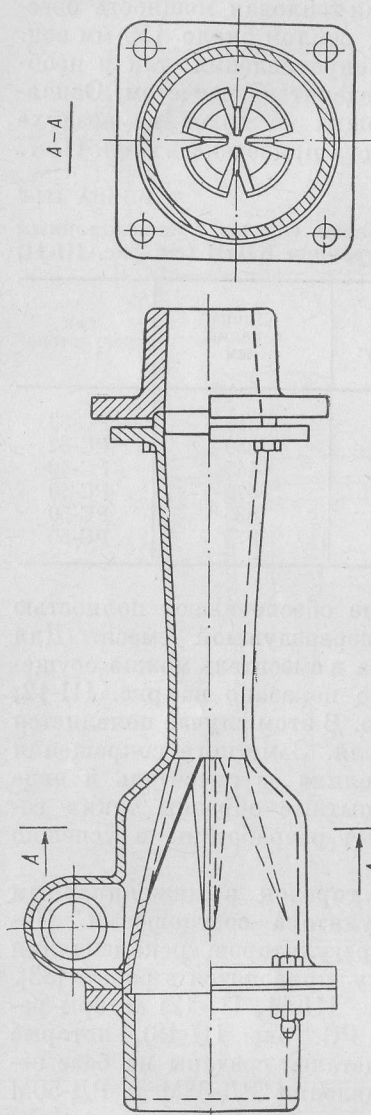


Рис. III-12. Дутьевая горелка с инжекционным смесителем и рассредоточенным подводом газа через ряд сопел.

ТАБЛИЦА III-8
Основные характеристики регуляторов РС (см. рис. III-13)

Показатели	РС-32	РС-40	РС-50
Условный диаметр, мм: входа выхода	25 32	32 40	32 50
Избыточное давление газа на входе, кгс/см ²		0,1—4,0	
Диаметр седла клапана, мм		8, 11, 15	15, 20, 25
Пропускная способность регулятора при перепаде давления на клапане 1000 мм вод. ст. и плотности газа (при 0°С и 760 мм рт. ст.) 1,0 кг/м ³ , кг/ч	4, 6, 10 4, 8, 12	16, 30, 50	51, 78, 100

подводится в верхнюю полость мембранной коробки. Импульс регулируемого давления подается под мембрану.

Необходимая пропускная способность регуляторов РС при рас- полагаемом давлении газа обеспечивается установкой соответствующего седла клапана. Причем расчетное располагаемое давление газа перед регулятором принимается равным минимально возможному при его работе. Характеристики регуляторов РС приводятся в табл. III-8. При изменении пропускной способности от 10 до 100% максимальная абсолютная погрешность,

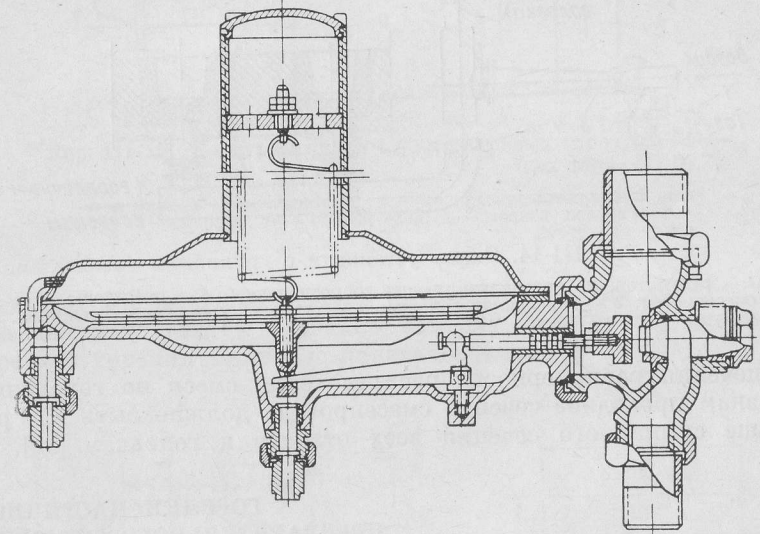


Рис. III-13. Регулятор соотношения РС (см. табл. III-8).

с которой регуляторы РС поддерживают заданное давление газа за собой, не превышает 1 мм вод. ст. Максимальная пропускная способность регуляторов (100—150 м³/ч) ограничивает предельную тепловую мощность горелки или группы горелок, обслуживаемых одним регулятором, величиной 0,8—1,0 Гкал/ч.

В ряде случаев для обеспечения равномерного нагрева на сводах или стенах печей устанавливают большое число горелок сравнительно малой мощности. Применение для этой цели горелок, имеющих индивидуальные смесители, представляет ряд неудобств, главным из которых является значительное увеличение протяженности воздухопроводов. Поэтому в таких случаях подготовку газозвдушной смеси организуют в групповом смесителе, вынесенном из зоны повышенных температур для облегчения его обслуживания. Смесители горелок, изображенных на рис. III-11, могут быть использованы в качестве групповых (рис. III-14). Газозвдушная смесь, подготовленная в смесителе 3, поступает

по смесепроводу 4, к ряду горелочных головок. Число головок зависит от мощности и конструктивных особенностей нагревательной установки. Для предотвращения проскока пламени в смесепровод перед каждой головкой необходимо иметь огнепреградитель 7.

При использовании групповых смесителей необходимо обеспечить по возможности отсутствие потерь давления в смесепровод. Следует помнить, что основные потери связаны с местными сопротивлениями тройников, изгибов, запорной арматуры и т. п. Для

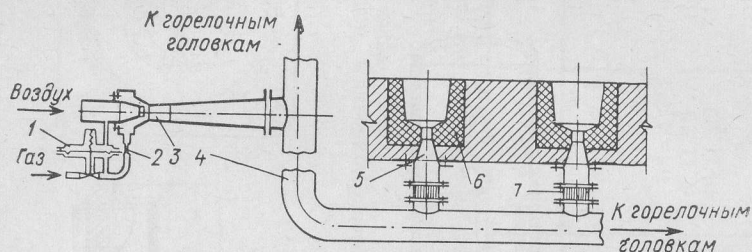


Рис. III-14. Схема установки с групповым смесителем.

1 — регулятор; 2 — стабилизирующее сопротивление; 3 — смеситель; 4 — смесепровод; 5 — горелочная головка; 6 — туннель; 7 — огнепреградитель.

обеспечения равномерности распределения смеси по горелочным головкам проходное сечение смесепровода должно быть в 3 раза больше суммарного сечения всех отводов к головкам [30].

§ III-3.

ГОРЕЛКИ ЧАСТИЧНОГО ПЕРЕДВАРИТЕЛЬНОГО СМЕШЕНИЯ

В горелках частичного завершеного смешения осуществляются хорошее перемешивание газа с частью необходимого для сгорания воздуха (обычно 50—60% от объема, требуемого для полного сгорания) и дополнительная подача остального воздуха к корню факела за счет разрежения в топке, вентиляторного дутья или непосредственно из атмосферы. Горелки последнего типа, часто применяемые в бытовых газовых приборах и небольших нагревательных установках, иногда называют атмосферными. В промышленности они распространения не получили из-за неудовлетворительного перемешивания с вторичным воздухом.

В горелках незавершенного смешения осуществляется частичное перемешивание газа со всем необходимым для горения воздухом. Заканчивается процесс смесеобразования в топке. Горелки этой группы применяют для сжигания газа в котельных установках и промышленных печах. Производительность их практически неограничена; для сжигания газа в энергетических котельных установках применяют горелки производительностью до 5000 м³/ч и выше.

В подавляющем большинстве случаев такие горелки работают с принудительной подачей воздуха. Давление газа может быть

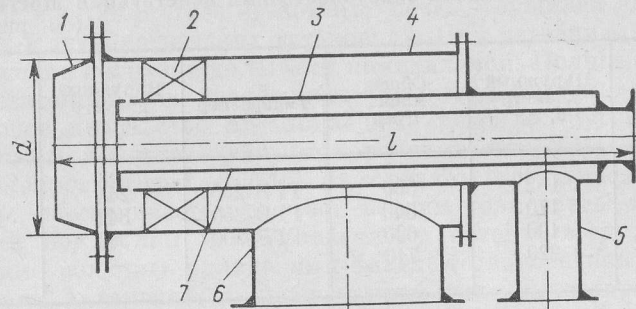


Рис. III-15. Конструктивная схема вихревых горелок ГТВ (см. табл. III-9).

1 — головка; 2 — завихритель; 3 — газораспределительный коллектор; 4 — корпус; 5 — подвод газа; 6 — подвод воздуха; 7 — смотровая труба.

принято от 100 до 3000, воздуха — от 30 до 250 мм вод. ст. Чем выше давление газа и особенно воздуха, тем лучше смешение и процесс горения ближе к кинетическому.

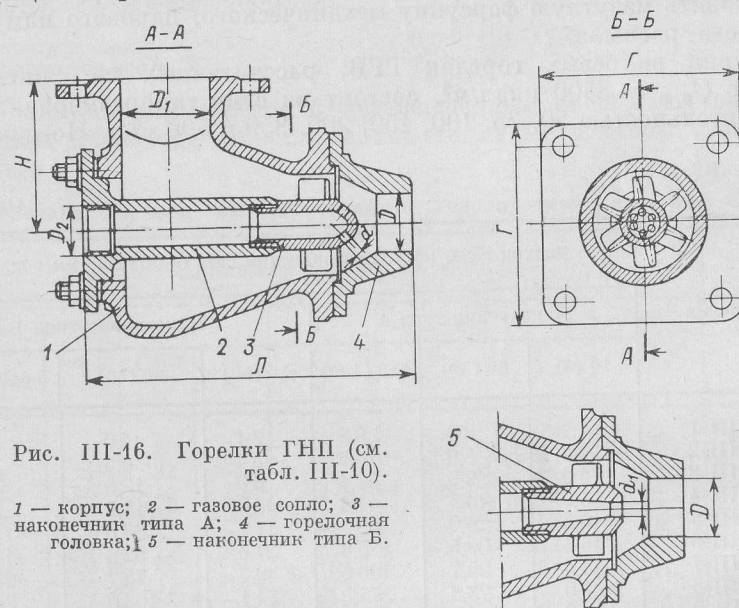


Рис. III-16. Горелки ГНП (см. табл. III-10).

1 — корпус; 2 — газовое сопло; 3 — наконечник типа А; 4 — горелочная головка; 5 — наконечник типа Б.

В качестве примера на рис. III-15 показана конструктивная схема горелок незавершенного предварительного смешения типа ГТВ конструкции Мосгазпроекта [91]. Эти горелки должны

ТАБЛИЦА III-9

Основные размеры вихревых горелок типа ГГВ с лопаточными закручивателями конструкции Мосгазпроекта (см. рис. III-15)

Типоразмер	Наружный диаметр d , мм	Общая длина l , мм	Типоразмер	Наружный диаметр d , мм	Общая длина l , мм
ГГВ-50	152	500	ГГВ-200	245	800
ГГВ-75	170	540	ГГВ-350	342	900
ГГВ-100	190	600	ГГВ-500	380	1050
ГГВ-150	220	710			

заменить выпускаемые серийно дутьевые горелки Мосгазпроекта типа ГА, которые имеют большие размеры, массу и, главное, сложную многоэлементную конструкцию. Болтовое соединение корпуса горелок ГГВ и газораспределительного коллектора с расположенным на нем завихрителем позволяет по-разному ориентировать работы по обвязке горелок. Завихритель горелки осевой лопаточный с углом подъема лопаток 45° . Внутри смотровой трубы можно установить мазутную форсунку механического, парового или воздушного распыла.

Серия вихревых горелок ГГВ, рассчитанных на сжигание газа с $Q_{p,n} = 8500$ ккал/м³, состоит из семи типоразмеров производительностью 50, 75, 100, 150, 200, 350 и 500 м³/ч. Номиналь-

Основные

Шифр горелки	Расход газа, м ³ /ч, при давлении газа (воздуха), мм вод. ст.					
	Наконечник типа А			Наконечник типа Б		
	10 (8)	60 (50)	640 (500)	10 (20)	60 (80)	640 (950)
ГНП-1	1,2	3,0	9,8	2,1	4,0	13,8
ГНП-2	2,0	5,0	16,6	3,4	6,5	22,3
ГНП-3	4,0	9,9	32,4	6,9	13,5	45,5
ГНП-4	5,9	14,4	47,4	10,0	18,9	65,6
ГНП-5	10,6	26,0	85,7	17,7	33,6	116,6
ГНП-6	16,1	39,5	130,0	27,6	52,5	182,0
ГНП-7	24,4	59,7	196,6	39,7	75,7	262,0
ГНП-8	32,0	78,3	275,5	54,1	103,0	357,0
ГНП-9	42,0	102,9	338,6	66,3	126,3	437,5

Примечания. 1. В горелках ГНП-1 и ГНП-2 в сопловом наконечнике типа А поступление 10 м³ воздуха на 1 м³ газа.

ные давления газа 3000, воздуха — 100 мм вод. ст. Основные габаритные размеры приведены в табл. III-9. Горелки предназначены для сжигания газа в котлах, печах, сушилах и других тепловых и технологических установках. Они устойчиво работают при снижении нагрузки до 10% от номинальной. Полное сжигание газа достигается при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1,05$.

Большое количество промышленных печей оборудовано нормализованными многоструйными горелками типа ГНП конструкции Теплопроекта (рис. III-16). В горелках этого типа частичное смешение обеспечивается за счет подачи газа через несколько отверстий под углом к направленному потоку воздуха. Если необходимо получить удлиненный факел, то наконечник газового сопла типа А заменяется наконечником типа Б, который имеет одно центральное отверстие для выхода газа, направленное параллельно потоку воздуха.

Номинальная производительность горелок ГНП соответствует давлению газа 60 мм вод. ст. Пределы стабильной работы горелок от 10 до 640 мм вод. ст. В табл. III-10 приведены основные характеристики горелок ГНП, рассчитанных на сжигание природного газа с теплотой сгорания $Q_{p,n} = 8500$ ккал/м³ и плотностью $\rho_{ог} = 0,73$ кг/м³. Горелки ГНП могут работать на холодном или подогретом до 500°C воздухе. Производительность их меняется следующим образом:

Температура воздуха, °С	0	100	150	200	300	400	500
Производительность, %	100	85	80	76	69	64	60

Достоинствами горелок с незавершенным смешением помимо большой производительности являются малые размеры, возмож-

ТАБЛИЦА III-10

характеристики горелок ГНП конструкции Теплопроекта (см. рис. III-16)

Шифр горелки	Основные размеры, мм							Масса, кг	
	d	d_2	D	D_1	D_2 (дюйм)	H	L		
ГНП-1	3,2	5,5	25	36	3/4	80	105	180	5,2
ГНП-2	4,2	7	32	41	3/4	90	120	200	6,5
ГНП-3	4,8	10	46	68	1	110	150	245	12,2
ГНП-4	5,8	12	55	80	1	120	160	285	14,7
ГНП-5	7,8	16	74	106	1 1/4	140	195	320	25,5
ГНП-6	9,6	20	92	131	1 1/2	160	210	355	29,0
ГНП-7	11,8	24	112	151	2	170	230	390	38,0
ГНП-8	13,5	28	130	175	2 1/2	200	250	440	47,0
ГНП-9	15,5	31	145	188	1 1/2	200	270	480	68,6

4 отверстия, у остальных типоразмеров — 6 отверстий. 2. В горелке предусмотрено

ность создания факела нужной геометрии и светимости, надежность работы, незначительная опасность проскока при широких пределах регулирования.

Коэффициенты избытка воздуха в зависимости от совершенства смешения для этих горелок обычно принимают 1,05—1,15. Тепловое напряжение топочного объема может быть достаточно высоким — до 850 Мкал/(м³·ч) и выше, но в расчетах его следует принимать не более 350—400 Мкал/(м³·ч), если нет уверенности в хорошем заполнении топки факелом и надежном зажигании факела близ устья горелки [79].

§ III-4.

ДИФФУЗИОННЫЕ ГОРЕЛКИ

В горелках чисто диффузионного типа (иногда называемых факельными или пламенными) смешение и горение протекают одновременно и целиком в пределах топки. Характеристики получающегося факела зависят в основном от скорости процесса перемешивания газа и воздуха. С уменьшением этой скорости факел удлиняется и имеет сажистый светящийся вид. При интенсификации турбулентного перемешивания путем разделения потоков на мелкие струи, направления их под углом друг к другу, закручивания, увеличения динамических напоров газа и воздуха можно получить малосветящийся и даже несветящийся диффузионный факел средней длины.

Диффузионные горелки применяют чаще всего на установках с большим объемом камеры сгорания, когда за счет растянутого горения требуется обеспечить равномерную теплоотдачу по всей тепловоспринимающей поверхности. При такой организации горения повышается стойкость футеровки печей за счет отдаления от поверхности кладки зоны максимальных температур. В некоторых случаях диффузионные горелки совершенно незаменимы, например в высокотемпературных печах (мартеновских, стекловаренных), так как при подогреве воздуха до температур, значительно превышающих температуру самовоспламенения газа, предварительное смешение газа с воздухом полностью исключается. Диффузионные горелки удобно komponуются на установках, использующих резервное топливо.

Достоинствами диффузионных горелок являются большие пределы регулирования из-за отсутствия опасности проскока пламени, безопасная работа при практически неограниченной температуре подогрева воздуха, высокая степень черноты факела, возможность работы без дутья и при низком давлении газа, простота конструкции и сравнительно небольшие размеры при большой единичной мощности. К недостаткам относятся необходимость некоторого повышения коэффициента избытка воздуха ($\alpha = 1,10 \div 1,15$) по сравнению с кинетическими горелками, более низкие тепловые напряжения топочного объема и ухудшение условий догорания газа в хвостовой части факела.

Тепловые напряжения топочного объема при диффузионном сгорании в котлах обычно лежат в пределах 300—400 Мкал/(м³·ч) и сильно зависят от давления газа, конструкции горелок и их размещения.

В высокотемпературных плавильных печах, где для интенсификации технологического процесса требуются значительно большие тепловые напряжения, иногда чисто диффузионные горелки заменяют комбинированными с частичным перемешиванием газа с воздухом.

В мартеновских и стекловаренных печах для увеличения настильности диффузионного факела внутри газовой струи подают

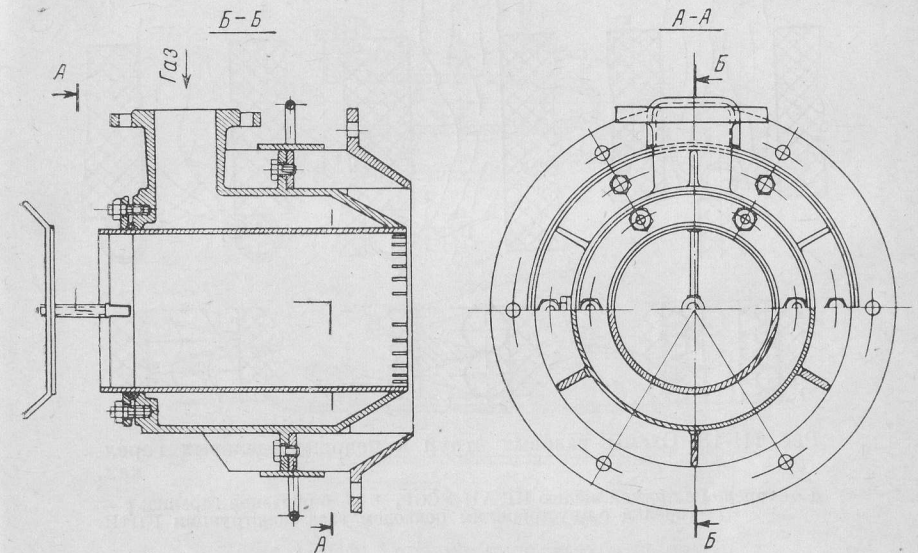


Рис. III-17. Диффузионная горелка КПТИ, работающая без вентиляторного дутья.

компрессорный воздух в количестве 5—10% от объема воздуха, необходимого для горения. Интенсификация плавки достигается за счет увеличения теплоотдачи конвекцией и приближения зоны высоких температур к тепловоспринимающей поверхности [36].

В котельной технике диффузионные горелки могут располагаться на фронтальной или боковой стенках топки, а также внутри ее, на поду. Горелки последнего типа получили название подовых.

Фронтальные диффузионные горелки, работающие как с принудительным дутьем, так и с подачей воздуха за счет разрежения в топке, с успехом применяют в небольших промышленных котлах судового типа, жаротрубных, КРШ, ДКВ и ДКВР и т. п. На рис. III-17 приведена диффузионная бездутьевая горелка конструкции КПТИ производительностью до 350 м³/ч. Для закручивания потока подача газа в горелке осуществляется из кольцевого

пространства корпуса через 16 или 32 сопловые щели, расположенные под углом к радиусу и оси горелки. Воздух в количестве примерно 50% от теоретически необходимого подводится через внутренний патрубок, остальной воздух (с учетом действительного избытка) в количестве 55—65% поступает через внешние окна регистра. Нормальное поступление воздуха обеспечивается разрежением в топке от 2 до 6 мм вод. ст. в зависимости от производительности горелки. Характеристики факела горелок можно изменять за счет выбора надлежащего давления газа, числа, размеров и угла наклона сопловых щелей.

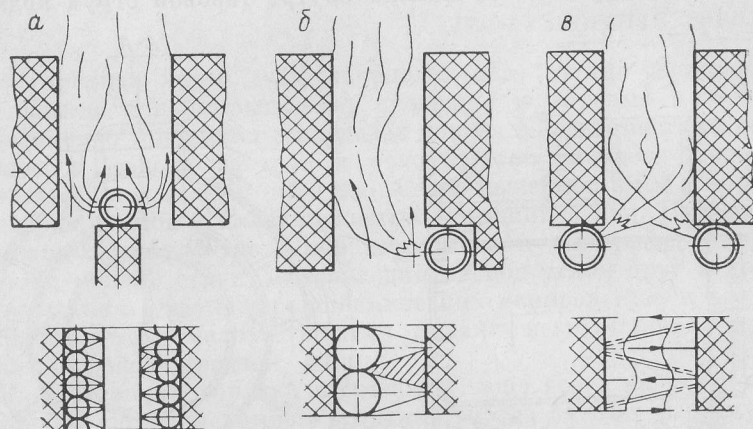


Рис. III-18. Схемы газовых струй в подовых щелевых горелках.

а — горелка с прямой щелью ИГ АН УССР; б — L-образная горелка; в — горелка с двусторонним подводом газа конструкции КПТИ.

В КПТИ разработана серия диффузионных горелок, состоящая из шести типоразмеров производительностью от 35 до 350 м³/ч. Производительность каждой горелки серии может меняться в 1,3—1,5 раза за счет монтажного перемещения среднего патрубка. Диффузионная горелка в подовом исполнении представляет собой газораспределительную трубу или систему труб с рядами отверстий. Она устанавливается на колосниковой решетке или поду топки в щелевом канале из огнеупорного материала, через который в топку поступает воздух. Горение струек газа, истекающих из отверстий в трубе, начинается в огнеупорном канале и заканчивается в топке. Размещение горелочных труб в щелевых каналах и схемы газовых струй показаны на рис. III-18.

В большинстве случаев подовые горелки из-за небольшого аэродинамического сопротивления работают без принудительной подачи воздуха. Опыт эксплуатации лучших образцов горелок показывает, что они обеспечивают практически полное сгорание при избытке воздуха в топке $\alpha = 1,05 \div 1,10$ [84]. Однако при-

менение неудачных конструкций приводит к отложениям сажи на поверхности нагрева котла.

Общим недостатком всех бездутьевых диффузионных горелок является необходимость устойчивого разрежения в топке и трудность осуществления автоматического пропорционирования газа и воздуха. При сжигании в котлах попутных газов со значительным содержанием высокомолекулярных углеводородов эти го-

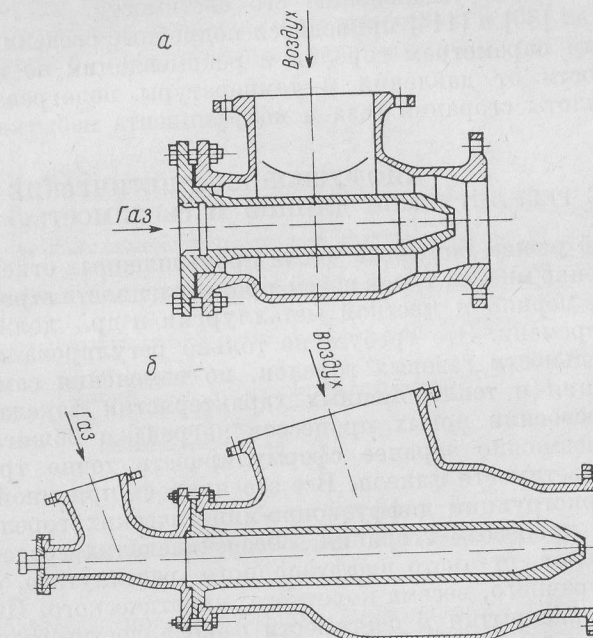


Рис. III-19. Горелки типа «труба в трубе».

а — средней тепловой мощности с присоединением газопровода на резьбе; б — большой тепловой мощности с присоединением газопровода через колено.

релки можно применять только при среднем давлении газа, особенно при высоких степенях экранирования топки.

Для диффузионного сжигания газа в печах Стальпроект разработал нормализованный ряд горелок типа «труба в трубе», средней и большой тепловой мощности. Горелки малой мощности имеют 5 типоразмеров с диаметром выходной части (носика или головки) от 20 до 50 мм. В качестве корпуса использован стандартный тройник, в который вворачиваются газовое сопло и головка. Горелки средней мощности (рис. III-19, а) выпускаются шести типоразмеров с диаметром носиков от 60 до 150 мм, а горелки большой мощности (рис. III-19, б) — десяти типоразмеров с диаметром носиков от 200 до 425 мм. Горелки средней и большой тепловой мощности выполнены из литых деталей и позволяют

применять подогрев газа и воздуха до 400° С. На основании длительного опыта эксплуатации рекомендуется поддерживать давление воздуха 200—300, газа — 400—600 мм вод. ст.

Растянутый по длине печи факел получается при сжигании газа с коэффициентом избытка воздуха $\alpha = 1,10 \div 1,05$. Химический недожог, имеющий при этом место, практически устраняется при повышении α до 1,10 ÷ 1,15 [30], однако это приводит к укорочению факела и уменьшению его светимости.

В работах [30] и [114] приводятся подробные сведения по конструктивным параметрам горелок и рекомендации по их выбору в зависимости от давления и температуры подогрева воздуха и газа, теплоты сгорания газа и коэффициента избытка воздуха.

§ III-5. ДИФФУЗИОННО-КИНЕТИЧЕСКИЕ ГОРЕЛКИ (С РЕГУЛИРУЕМОЙ ДЛИНОЙ И СВИТИМОСТЬЮ ФАКЕЛА)

Тепловой режим большого числа промышленных огневых установок, особенно многих типов печей промышленности строительных материалов, черной и цветной металлургии и др., должен изменяться во времени. Это требует не только регулирования теплопроизводительности газовых горелок, но изменения самого процесса сгорания и теплообменных характеристик факела. Кроме того, при освоении новых процессов нагрева и обжига далеко не всегда возможно заранее сформулировать точно требование по длине и светимости факела. Все это явилось причиной появления ряда конструкций диффузионно-кинетических горелок с регулируемым процессом сгорания, обеспечивающих создание различных факелов, от чисто диффузионного, растянутого, светящегося до прозрачного, весьма короткого, кинетического. Изменение длины, угла раскрытия и светимости факела достигается за счет соответствующего изменения аэродинамической структуры потока и качества подготовки газозвушной смеси.

Известны конструкции горелок с регулируемой длиной факела, созданные во ВНИИМТ, Южгипроцементе, ГипроНИИГазе, АзНИИГазе, СредазНИИГазе, ВНИИПромгазе и др. Практика работы этих горелочных устройств показывает, что горелка ВНИИМТ-У работает с постоянным расходом воздуха и с переменным расходом газа, так как завихритель в газовом сопле при продольном перемещении значительно изменяет сопротивление сопла. Горелка ВНИИМТ-АТ обеспечивает изменение длины факела при постоянном расходе газа, но за счет меняющегося сопротивления воздушного тракта (при разных углах поворота лопаток завихрителя воздуха) работает с переменным коэффициентом избытка воздуха. В однопроводных горелках, разработанных в Южгипроцементе, ГипроНИИГазе и АзНИИГазе, постоянство расхода газа не обеспечивается по той же причине, что и в горелке ВНИИМТ-У, т. е. сопротивление газового сопла значительно меняется при переходе с одного режима работы на

другой. Таким образом, изменение коэффициента избытка воздуха во всех этих случаях приводит к нарушению теплового режима газоиспользующих установок.

Горелка, созданная в КПТИ (рис. III-20, табл. III-11), позволяет изменять в широком диапазоне длину и угол раскрытия факела при одновременном обеспечении постоянства расхода газа и воздуха через нее [85]. Горелка состоит из воздушного корпуса 3, внутри которого расположен газовый корпус 2 с газораспределительным устройством, состоящим из дроссельной шайбы 5 и газораспределителя 6. Регулирование режима горения осуществляется

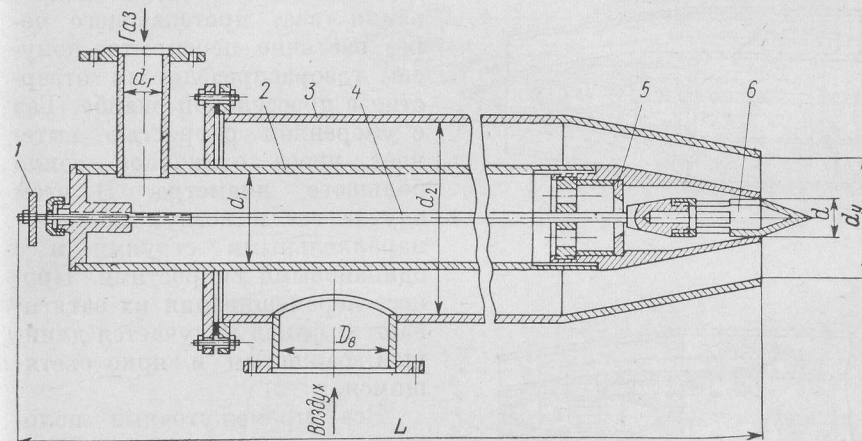


Рис. III-20. Горелка с регулируемыми характеристиками факела (см. табл. III-11).

за счет возвратно-поступательного перемещения тягой 4 газораспределителя 6 при вращении маховика 1. На рис. III-21 представлены положения газораспределителя при двух крайних режимах работы горелки — на коротком факеле и на длинном.

При крайнем правом положении газораспределителя (см. рис. III-21, а) весь газ под средним давлением через камеру А газового корпуса и камеру В газораспределителя поступает к

ТАБЛИЦА III-11
Технические характеристики горелок с регулируемой длиной и светимостью факела конструкции КПТИ (см. рис. III-20)

Тепловая мощность горелки, Гкал/ч	Основные размеры, мм							Масса, кг
	d	d _y	d ₁	d ₂	d _r	D ₆	L	
3,0	55	180	127	245	100	219	2000	135
7,5	90	282	180	377	149	325	2500	300
9,5	100	318	230	426	170	377	3000	382
12,5	120	360	245	480	219	426	3500	496

сопловым отверстиям малого диаметра на конусе газораспределителя и вытекает из них под большим углом ($> 90^\circ$) к потоку воздуха. Газ выходит с большой скоростью струями малого диаметра, пронизывая весь поток выходящего из горелки воздуха. При этом создаются хорошие условия для перемешивания и образования горючей смеси и факел получается коротким, с широким углом раскрытия и малой светимостью.

При перемещении газораспределителя в крайнее левое положение (см. рис. III-21, б) в камере А устанавливается пониженное давление за счет дросселирования газа, протекающего через частично перекрытое конусом газораспределителя отверстие в дроссельной шайбе. Газ с умеренной скоростью вытекает через одиночное сопло большого диаметра. В этом случае газ и воздух истекают параллельными струями и с одинаковыми скоростями. Процесс перемешивания их затягивается, факел получается длинным, сажистым и ярко светящимся.

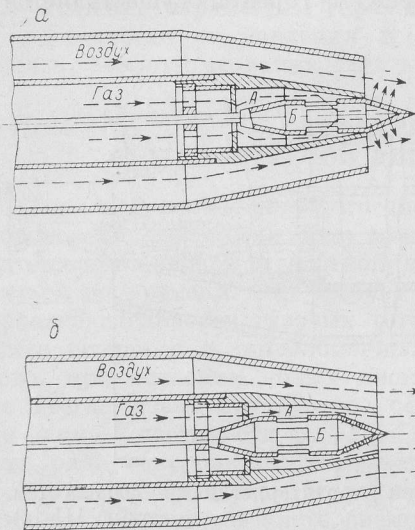


Рис. III-21. Положения газораспределителя при двух крайних режимах работы горелки КПТИ с регулируемыми характеристиками факела.

Все промежуточные положения газораспределителя обеспечивают сгорание газа в факеле, характеристики которого лежат в пределах, соответствующих крайним положениям.

Профили газораспределительного клапана рассчитаны так, что при перемещении его суммарное сопротивление горелки и, следовательно, расход газа через горелку сохраняются постоянными.

Как показали исследования и эксплуатация, горелка позволяет перемещать положение максимума температур в пределах 1,25 калибра печи (внутреннего диаметра). Некоторые сведения по характеристикам и опыту эксплуатации различных горелок с регулируемыми теплообменными характеристиками приведены в гл. X-1.

§ III-6.

ГОРЕЛКИ ДРУГИХ ТИПОВ

Горелки инфракрасного излучения (радиационные)

Инфракрасное излучение можно создать при сжигании хорошо подготовленной газовой смеси на специальных насадках или при диффузионном сжигании в плоскофакельных горелках

с разомкнутым факелом. Радиационные горелки с насадками или излучателями для подготовки смеси снабжаются инжекционными или дутьевыми смесителями и реже специальными смесительными

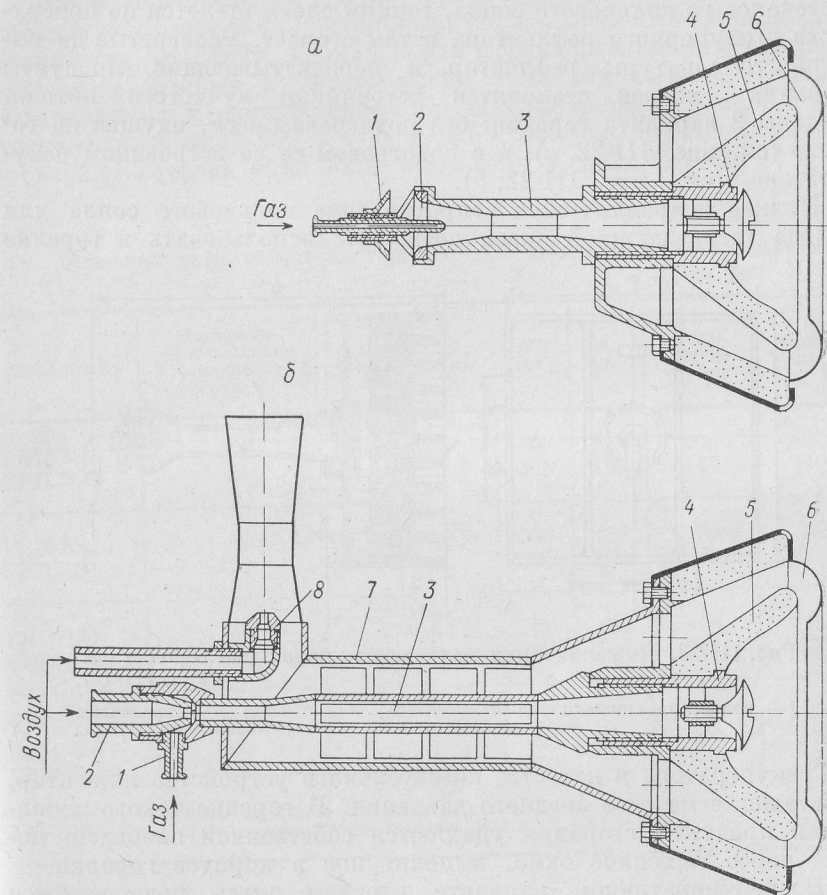


Рис. III-22. Радиационные горелки с керамическими излучателями чашечного типа без подогрева (а) и с подогревом (б) газовой смеси.

1 — газовый патрубок; 2 — канал для подвода воздуха; 3 — смеситель; 4 — кольцевое сопло; 5 — керамический излучатель; 6 — перехватывающий козырек; 7 — рекуператор; 8 — эжектор.

машинами. В зависимости от конструкции излучателя они делятся на следующие типы:

- 1) с керамическими излучателями;
- 2) с керамическими перфорированными излучателями;
- 3) с керамическими пористыми излучателями;
- 4) с металлическими излучателями;
- 5) с низкотемпературными (каталитическими) излучателями.

На рис. III-22 показаны радиационные горелки с керамическими излучателями чашечного типа конструкций КПТИ [86]. Во время работы горелок подготовленная газозвудушная смесь, растекаясь из кольцевого сопла, тонким слоем стелется по поверхности огнеупорного рефлектора и там сгорает. Разогретые до высокой температуры рефлектор и перехватывающий продукты сгорания козырек становятся источником лучистого потока. Созданы 2 варианта горелок: без подогрева смеси, идущей на горение (см. рис. III-22, а), и с подогревом ее во встроенном рекуператоре (см. рис. III-22, б).

Низкое гидравлическое сопротивление кольцевого сопла для выхода газозвудушной смеси позволило использовать в горелке

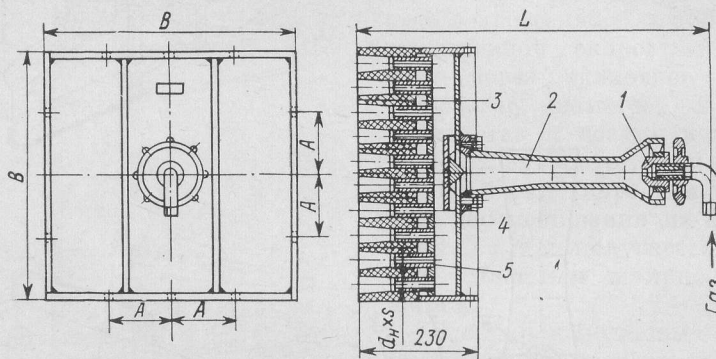


Рис. III-23. Инжекционная излучающая панельная горелка (см. табл. III-12).

1 — сопло; 2 — инжекционный смеситель; 3 — панель; 4 — горелочные керамические призмы; 5 — металлические трубки.

без рекуператора в качестве смесительного устройства инжектор, работающий на газе среднего давления. В горелке такого исполнения продукты сгорания удаляются собственной энергией потока через выходное окно, выполненное в корпусе горелки.

В рекуперативном варианте горелки смесь подогревается во встроенном рекуператоре с двусторонним оребрением. Для турбулизации потока ребра по тракту продуктов сгорания делаются короткими, с разрывами.

Газозвудушная смесь готовится в инжекционном смесителе с активной воздушной струей, работающем от вентилятора среднего давления. Продукты сгорания просасываются через рекуператор эжектором, в котором в качестве активной струи используется часть воздуха, идущего на образование газозвудушной смеси.

Чаши существующих радиационных горелок выполняются с гладкой поверхностью либо ступенчатой за счет нанесения определенного количества рядов концентрически расположенных поперечных уступов. Однако, как показали проведенные в КПТИ

опыты, большую теплоотдачу можно получить от излучающей поверхности, снабженной продольными ребрами прямоугольного поперечного сечения.

Для отопления печей нефтеперерабатывающих заводов в Гипро-нефтемаше созданы инжекционные излучающие панельные горелки типа ГБП (рис. III-23). В них предварительно подготовленная смесь сгорает в керамических туннелях малого размера, объединенных в единую перфорированную панель. Размеры выпускаемых панелей 500 × 500 и 605 × 605 мм. Основные характеристики горелок типа ГБП приведены в табл. III-12.

ТАБЛИЦА III-12

Основные характеристики горелок ГБП конструкции Гипро-нефтемаша (см. рис. III-23)

Типоразмер	Номинальная тепловая мощность, Мкал/ч	$d_n \times s$, мм	L, мм	B, мм	A, мм	Количество трубок	Масса, кг
ГБП-35	35	6 × 1	740	500	125	100	85
ГБП-55	55			605	150	144	110
ГБП-85	85	8 × 1,25		500	125	100	92
ГБП-120	120			605	150	144	118
ГБП-140	140	10 × 1,25		500	125	100	89
ГБП-200	200			605	150	144	124
ГБП-280	280	10 × 1,25	945	500	125	196	94
ГБП-400	400			605		289	131
ГБП-530	530			500		365	100

Примечание. Диаметр газовых сопел горелок определяется расчетом по методике, приведенной в нормалю на горелки МН 2932—61 и МН 2933—61.

Кроме перфорированных панелей в качестве излучателей применяют и пористую керамику, состоящую из кварцевых и шамотных зерен. Плитки из такой керамики имеют невысокую стоимость. Достоинствами излучателей из пористой керамики по сравнению с керамическими перфорированными насадками являются большая прочность и уменьшение потерь тепла, передаваемого в сторону смесителя, за счет снижения температуры тыльной стороны плитки без снижения температуры наружной стороны [55]. Однако пористая керамика имеет повышенное гидравлическое сопротивление. Поэтому для работы горелки требуется принудительная подача воздуха или высокое давление газа. Все керамические излучатели чувствительны к ударам и вибрациям, а также воздействию капель жидкости.

В качестве излучателей применяют также несколько рядов плетеных сеток различного сечения, которые изготовляют из жаростойкой малоокисляющейся стали.

Многие конструкции горелок инфракрасного излучения могут работать при низких давлениях газа (до 500 мм вод. ст.), но они мало устойчивы к задуванию ветром и не могут работать из-за проскока пламени в случае обогрева поверхностей с температурой выше 300—400° С. Чтобы уменьшить влияние ветра (при установке на открытом воздухе), горелки некоторых конструкций имеют

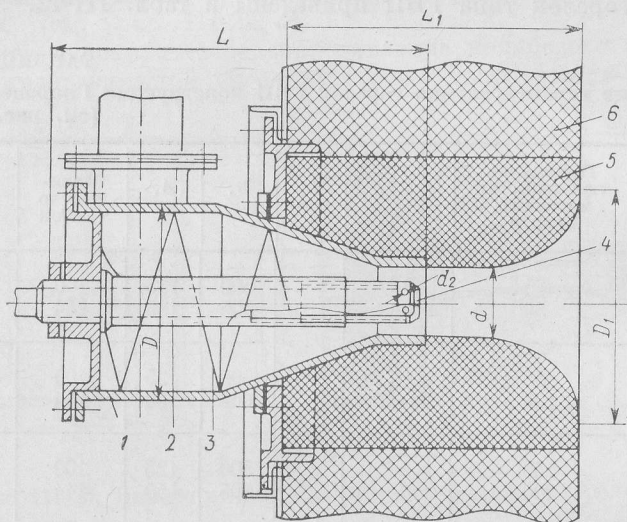


Рис. III-24. Плоскопламенная газовая горелка (см. табл. III-13).

1 — корпус; 2 — газопроводящая труба; 3 — воздушнонаправляющее устройство; 4 — сопловой насадок; 5 — туннель; 6 — кладка.

окна по фронту для забора воздуха в инжектор. Благодаря этому динамический напор в результате обдувания горелки ветром уравнивается дополнительным напором, создаваемым инжектором. Горелки с пористыми керамическими насадками (вместо дырчатых) более устойчивы к воздействию ветра и могут быть использованы для нагрева поверхностей, имеющих повышенную температуру.

Во взрывоопасных средах иногда применяют (особенно за рубежом) низкотемпературные каталитические излучатели, позволяющие сжигать газ при 100—400° С, т. е. ниже температуры его воспламенения. Это достигается за счет сжигания газозвушной смеси на каталитически активном огнеупоре. В момент пуска горелки огнеупор разогревается с помощью электрического нагревателя. После начала реакции окисления подача электрического

тока прекращается. Удельная тепловая нагрузка каталитических излучателей около 1 ккал/(см²·ч), в то время как у инфракрасных излучателей при температуре на поверхности 900° С — около 15—17 ккал/(см²·ч) [55].

Плоскопламенные горелки предназначены для обеспечения равномерного нагрева значительных по величине тепловоспринимающих поверхностей. Горелки создают разомкнутый факел с углом раскрытия 180°, растекающийся веерообразно по поверхности кладки. Это обеспечивается за счет введения в газозвушной поток направляющих элементов и его предварительного закручивания. Газ, постепенно сгорая на поверхности кладки, раскаляет ее, и она становится мощным источником теплоотдачи к нагреваемым изделиям.

Известны конструкции плоскопламенных горелок, применяемых в США, ФРГ, Франции, ГДР и других странах. В нашей стране удачная конструкция плоскопламенной горелки [61] создана в ИГ АН УССР (рис. III-24, табл. III-13). Номинальное давление воздуха для этих горелок при 20° С — 300, газа перед горелкой — 1200—2000 мм вод. ст. (в зависимости от необходимого диапазона устойчивой работы). Пределы регулирования при устойчивой работе горелок в режиме разомкнутых факелов не менее 4 : 1 [36].

ТАБЛИЦА III-13

Основные характеристики плоскопламенных горелок типа ГПП конструкции ИГ АН УССР (см. рис. III-24)

Технические показатели	Типоразмер						
	ГПП-1	ГПП-2	ГПП-3	ГПП-4	ГПП-5	ГПП-6	ГПП-7
Номинальная тепловая мощность ($P_{г.н} = 2000$ мм вод. ст.), Мкал/ч	42,5	85	170	340	680	1062	1360
Расход природного газа при номинальной нагрузке, м ³ /ч	5	10	20	40	80	125	160
Диаметр газвыходных отверстий $d_{г}$, мм	1,5	2,0	2,7	3,8	5,4	4,8	5,4
Количество газвыходных отверстий			6			12	
Диаметр цилиндрической части корпуса горелки D , мм	85	116	170	220	280	350	400
Диаметр цилиндрической части туннеля d , мм	25	35	50	75	105	140	165
Диаметр среза туннеля D_1 , мм	145	195	260	315	405	470	535
Длина горелки L , мм	175	220	325	375	440	550	625
Длина туннеля L_1 , мм	95	110	125	205	240	255	280
Масса, кг	35	53	135	184	375	560	622

Струйно-стабилизаторные газогорелочные устройства

Для некоторых промышленных установок требуются горелки, обеспечивающие интенсивное сжигание газа в режимах с большими колебаниями избытка воздуха. В основу работы таких горелок может быть положен струйно-стабилизаторный метод сжигания газового топлива, подробно исследованный В. А. Христячем и Г. Н. Любчиком в Киевском политехническом институте [126]. Сущность этого метода заключается в том, что газ

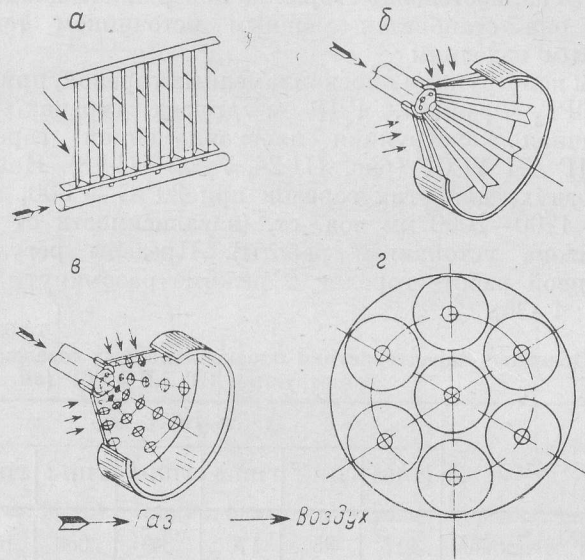


Рис. III-25. Варианты струйно-стабилизирующих газогорелочных устройств.
а — уголкового; б — шатровые; в — конические; г — блочные.

подается вдоль тыльной стороны стабилизатора в виде тела плохо-обтекаемой формы, в то время как воздушный поток натекает на него. Высокая турбулентность циркуляционной зоны в следе за стабилизатором воздействует на факел и позволяет сжигать газ в режиме, близком к кинетическому [125].

На рис. III-25, а показана горелка, собираемая из однотипных ячеек, представляющих собою уголкового стабилизаторы. Подача газа осуществляется из общего коллектора. В горелке на рис. III-25, б газ подается через центральную многосопловую форсунку к системе стабилизаторов, образующих коническую (шатровую) конструкцию. На рис. III-25, в изображена горелка, конус которой изготовлен из дырчатого листа. Функции стабилизаторов выполняют затемненные секторы между отверстиями ко-

нуса. Два последних типа горелок могут набираться в блоки любой производительности (см. рис. III-25, г).

Приведенные типы горелок отличаются простотой конструкции, легкостью обслуживания. Они предназначены для камер сгорания газовых турбин, установок подогрева воздуха для металлургических печей, различных типов сушильных установок и т. п.

Турбореактивные горелки

В турбореактивных горелках (рис. III-26, табл. III-14), созданных в ГипроНИИГазе, энергия давления газа с помощью реактивной турбинки приводит во вращение осевой вентилятор, который нагнетает идущий на горение воздух [34].

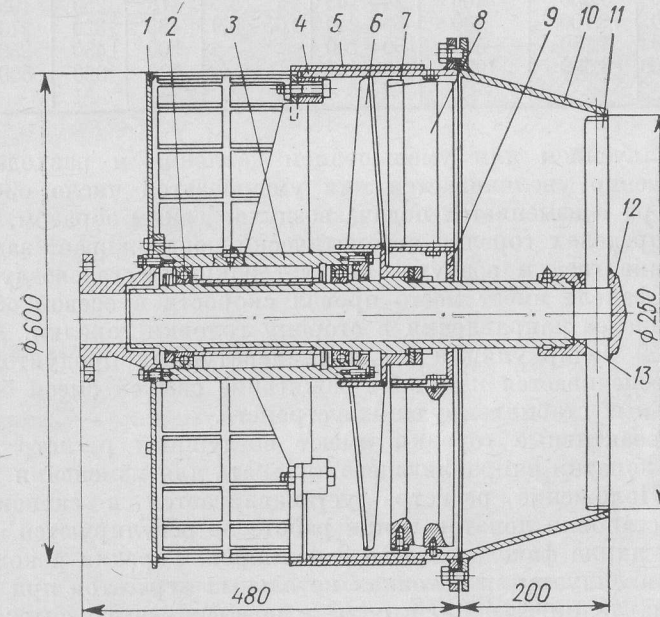


Рис. III-26. Общий вид турбореактивной газовой горелки ГГТР-С-1000 (см. табл. III-14).

1 — экран для глушения шума; 2 — шарикоподшипники; 3 — корпус подшипникового узла; 4 — корпус горелки; 5 — поворотное кольцо воздушного регистра; 6 — осевой вентилятор; 7 — поворотное кольцо; 8 — направляющий аппарат; 9 — обтекатель; 10 — головка горелки; 11 — полые лопатки; 12 — ступица; 13 — по-
лый вал.

Газ по полуму валу, выполняющему функции газоподводящего коллектора, поступает в полые лопатки реактивной турбинки и вытекает через сопловые отверстия, просверленные под углом 15° к плоскости вращения. Под действием возникающей при этом реактивной силы приводится во вращение вал и закрепленный

на нем вентилятор. При вращении вентилятора воздух засасывается через регистр из атмосферы и подается в горелку, где перемешивается с газом.

ТАБЛИЦА III-14

Основные характеристики турбореактивных горелок конструкции ГипроНИИГаза (см. рис. III-26)

Тип	Номинальная тепловая нагрузка, Гкал/ч	Номинальный расход газа, м³/ч	Пределы регулирования		Длина, мм	Диаметр корпуса, мм	Диаметр устья, мм	Масса, кг
			по расходу, м³/ч	по давлению, кгс/см²				
ГГТР-С-50	0,425	50	12—70	0,05—0,9	345	220	165	12
ГГТР-С-100	0,850	100	24—145		415	250	195	20
ГГТР-С-200	1,700	200	56—280		485	320	270	56
ГГТР-С-500	4,250	500	150—700		500	450	350	80
ГГТР-С-1000	8,500	1000	350—1450		700	620	500	100

С увеличением или уменьшением давления и расхода газа соответственно увеличивается или уменьшается число оборотов вентилятора и изменяется подача воздуха. Таким образом, в известных пределах горелка автоматически поддерживает заданное соотношение газа и воздуха. За счет закрутки газоздушного потока в факеле имеет место провал скорости в осевой области и изменение ее направления в сторону головки горелки. Благодаря такой рециркуляции высокотемпературных продуктов сгорания обеспечивается надежное зажигание свежей смеси без дополнительных стабилизирующих устройств.

Турбореактивные горелки имеют воздушный регистр и поворотные лопатки направляющего аппарата для изменения длины факела. Положение регистра устанавливается в зависимости от угла установки лопаток и при работе не регулируются. Относительная длина факела от 5 до 8 калибров. Горелки рекомендуются для эксплуатации в топках котельных агрегатов при номинальном давлении газа 0,5 кгс/см² и коэффициенте избытка воздуха 1,03—1,07.

Высокоскоростные газовые горелки

С целью увеличения кратности циркуляции продуктов сгорания в печах, для обеспечения равномерности нагрева и интенсификации процесса теплопередачи за счет увеличения конвективной составляющей применяют высокоскоростные газогорелочные устройства

Высокоскоростная, или называемая иногда реактивной, горелка представляет собой смеситель и камеру сгорания с сильно пережатым выходным сечением, составляющим 30—50% от по-

перечного сечения самой камеры сгорания. Последняя может иметь любую форму с гладкой или ребристой внутренней поверхностью. Она выполняется из керамики или металла с воздушным или

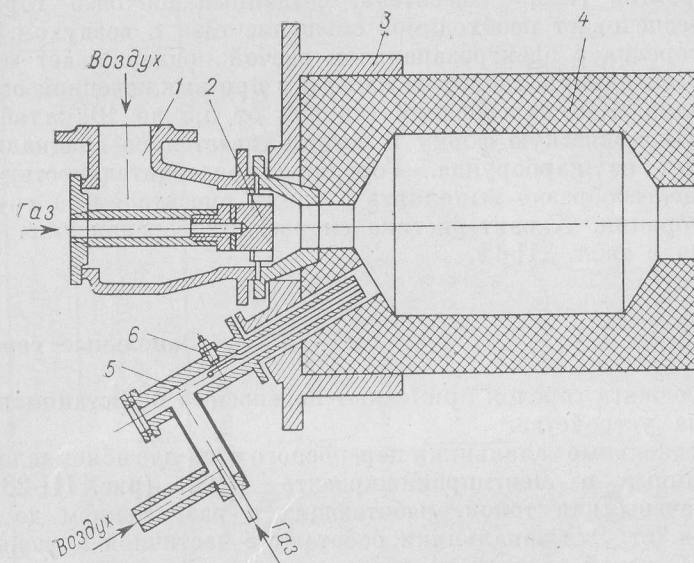


Рис. III-27. Скоростная горелка типа ГСК с керамической камерой сгорания (см. табл. III-15).

1 — смеситель; 2 — газовый насадок; 3 — плита; 4 — камера из карборунда; 5 — электрогазовый запальник (пилотная горелка); 6 — электро-света.

ТАБЛИЦА III-15

Характеристика скоростных горелок типа ГСК конструкции ВНИИПромгаза (см. рис. III-27)

Технические показатели	Типоразмер	
	I	IV
Расход газа, м³/ч	7	35
Давление газа перед горелкой, мм вод. ст.	1400	1500
Давление воздуха перед горелкой, мм вод. ст.	1200	800
Скорость продуктов сгорания на выходе из камеры сгорания, м/сек	200	
Пределы регулирования	1 : 5	
Коэффициент избытка воздуха	0,8—1,3	

водяным охлаждением. Скорости истечения продуктов сгорания 100—300 м/сек.

В качестве примера на рис. III-27 показана скоростная горелка с керамической камерой сгорания типа ГСК конструкции ВНИИПромгаз [122]. Смеситель, созданный на базе горелки ГНП, обеспечивает необходимое смешение газа с воздухом. Пилотная горелка с электрозапальной свечой поддерживает минимально необходимую тепловую нагрузку при выключенной основной горелке. Камера сгорания (длиной от 5,5 до 10 калибров) имеет цилиндрическую форму и изготавливается по специальной технологии из карборунда. Горелки производительностью до 12 м³/ч целесообразно выполнять с одним смесителем на группу камер сгорания. Характеристика скоростных горелок типа ГСК приведена в табл. III-15.

Запальные горелки

Для розжига горелок применяют переносные и дистанционные запальные устройства.

Однофакельные запальники переносного типа на гибком шланге, разработанные в Ленгипроинжпроект [128] (рис. III-28, а), предназначены для топок, работающих с разрежением до 8—10 мм вод. ст. Эти запальники работают с частичной инжекцией воздуха. Огневой насадок помещен в защитный кожух, который предохраняет факел от срыва воздушным потоком при внесении запальника в топку. Аналогичные многофакельные запальники (см. рис. III-28, б) отличаются только конструкцией огневого насадка. Он выполнен в виде цилиндра с отверстиями на боковой поверхности. Многофакельные запальники применяются в топках, работающих с разрежением не более 5 мм вод. ст., когда необходимо зажечь несколько близко расположенных горелок.

В топках с противодавлением следует использовать запальники, изображенные на рис. III-28, в и г. Первый из них работает как инжекционная горелка полного предварительного смешения, а второй — как горелка с принудительной подачей воздуха. Общая длина любого из запальников может быть изменена по месту за счет трубы-удлинителя. Характеристики переносных ручных запальников приведены в табл. III-16.

В дистанционных запальных устройствах источником зажигания служит электрический разряд или раскаленное сопротивление, которые либо непосредственно поджигают основной поток газозвушной смеси, либо вначале создают небольшой промежуточный факел от пусковой горелки, служащей запальником для рабочей горелки. Запальные устройства этого типа, выпускаемые заводом «Ильмарине», более надежны в эксплуатации и широко применяются в газотурбинных установках, в установках погруженного горения и т. д.

ТАБЛИЦА III-16
Основные характеристики переносных ручных запальников конструкции Ленгипроинжпроект (см. рис. III-28)

Номер запальника	Теплота сгорания газа, Мкал/м ³	Рекомендуемое давление газа, мм вод. ст.	Тепловая мощность при максимальном давлении, Мкал/ч	Диаметр сопла, мм	Отверстия для воздуха		Разрежение (противодавление) в топке, мм вод. ст.	Длина факела, мм
					Количество	Диаметр, мм		
Однофакельные инжекционные								
1	6,5—8,5	50—500	8,5	2,20	4	10	—0,5—8,0	200—350
2	6,5—8,5	1000—10 000	8,5	1,25	4	40	—0,5—10	200—350
3	22,0—24,0	100—500	8,4	1,25	4	40	—0,5—8,0	250—400
4	22,0—24,0	1000—10 000	8,4	0,85	4	40	—0,5—10	250—400
Многофакельные инжекционные								
5	6,5—8,5	50—500	11,5	2,5	4	8	—0,5—5,0	40—170
6	6,5—8,5	1000—10 000	11,5	1,25	4	5	—0,5—5,0	60—150
7	22,0—24,0	100—500	18,0	2,00	4	8	—0,5—6,0	80—170
8	22,0—24,0	1000—10 000	18,0	1,00	4	5	—0,5—6,0	100—180
Однофакельные инжекционные (для топок с противодавлением)								
9	6,5—8,5	2000—10 000	3,8	0,55	4	12	2,5 ÷ —4,5	400
10	22,0—24,0	2000—10 000	6,0	0,28	4	12	2,0 ÷ —1,5	130
Однофакельные с принудительной подачей воздуха								
11	6,5—8,5	100—500	3,8	1,40	—	—	2,5 ÷ —4,5	400
12	22,0—24,0	150—500	6,0	0,80	—	—	3,0 ÷ —1,5	120

Примечание. Давление воздуха для запальников № 11 и 12 не менее 80 мм вод. ст.

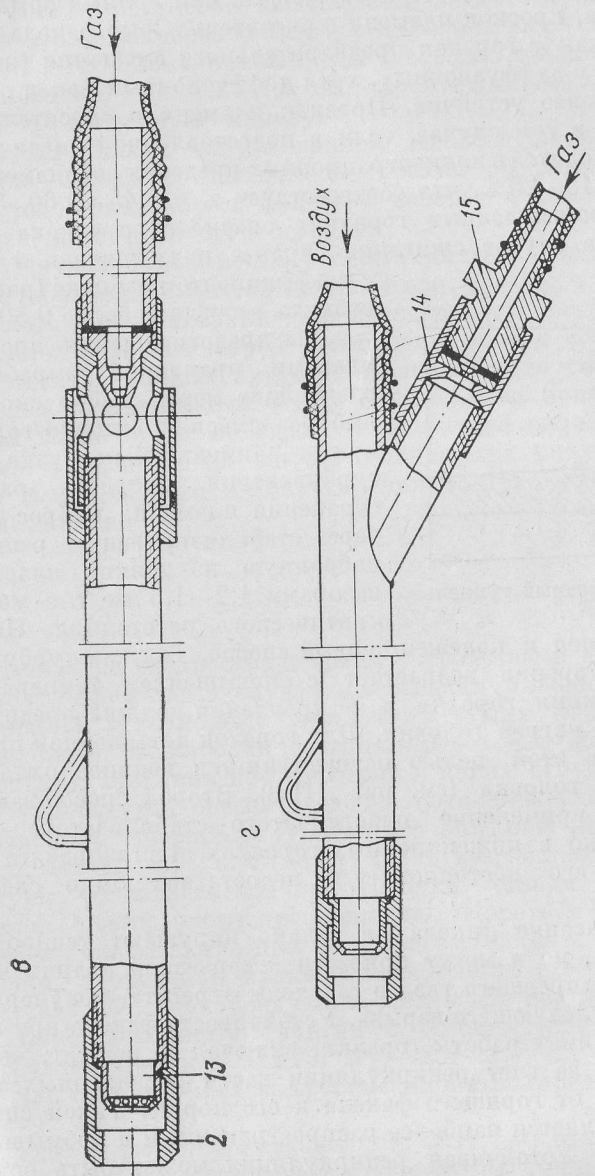
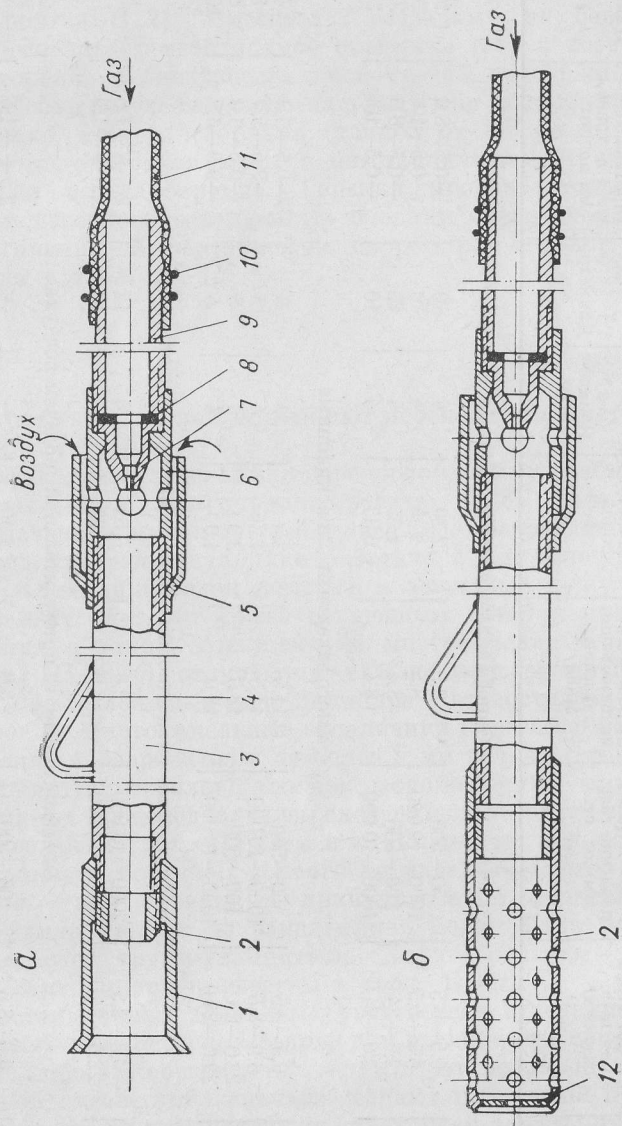


Рис. 111-28. Переносные газовые запальники.
 Для топок с разрезением: а — однофакельный, б — многофакельный; для топок с противодавлением: в — однофакельный, г — многофакельный; для топок с принудительной подачей воздуха: д — однофакельный, е — многофакельный. 1 — защитный кожух; 2 — огневой насадок; 3 — смеситель; 4 — крышечка; 5 — обойма; 6 — корпус инжектора; 7 — сопло; 8 — прокладка; 9 — удлинитель-рукоятка 10 — провод; 11 — дюритовый шланг; 12 — заглушка; 13 — кольцевой стабилизатор; 14 — муфта; 15 — штуцер.

Во время работы горелки или в процессе ее розжига возможны 2 явления, нарушающих ее работу: отрыв или полный срыв и погасание факела, проскок пламени в смеситель. Срыв факела может наблюдаться как у горелок предварительного смешения (кинетических), так и у диффузионных, хотя диффузионный факел обычно значительно более устойчив. Проскок пламени в смеситель возможен только в том случае, если в подготовленной смеси содержание газа находится в концентрационных пределах воспламенения, т. е. не более 15—20%, что соответствует $\alpha = 0,45 \div 0,60$. Таким образом, в промышленных горелках опасность проскока имеет место только в случае сжигания заранее подготовленной смеси

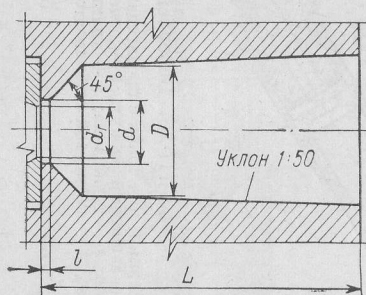


Рис. III-29. Горелочный туннель.

с коэффициентом избытка (расхода) воздуха в среднем более 0,50. Для предотвращения проскока пламени практикой выработаны следующие меры: выбор скорости выброса смеси из головки горелки при ее наименьшей нагрузке выше турбулентной скорости распространения пламени; выброс смеси через стабилизирующую решетку, набранную из тонких пластин с зазорами 1,2—1,6 мм, т. е. меньше критического расстояния. Наиболее распространен и надежен первый способ. Так как турбулентная скорость горения возрастает с повышением температуры смеси, конструкция горелки и ее крепления должна предотвращать заметный нагрев головки. Для горелок повышенной производительности с этой целью осуществляется водяное охлаждение горелочной головки (см. рис. III-8). Второй способ защиты от проскока — применение пластинчатого стабилизатора — использован только в инжекционных горелках Мосгазпроекта (см. рис. III-5). О его достоинствах и недостатках было сказано в § III-2.

Срыв и погасание факела не только нарушают теплообмен в зоне сгорания, но и могут привести к серьезной аварии из-за поступления несгоревшего газа в газоходы агрегата, рекуператор или боров и последующего взрыва. Устойчивость факела при всех допустимых режимах работы горелки, включая ее розжиг, может быть обеспечена за счет рециркуляции части раскаленных продуктов сгорания от горящего факела к его корню. Такой способ стабилизации является наиболее распространенным в промышленных установках. Устойчивая рециркуляция может быть осуществлена за счет направления потока смеси или отдельно газа и воздуха в специальный туннель (рис. III-29) или помещения на пути потока плохообтекаемого тела (см. рис. III-9). Аналогич-

ный результат достигается при направлении потока смеси на огнеупорную наброску или стенку. Расстояние до таких стабилизаторов не должно превышать 5—10 калибров горелки.

В небольших горелках нередко применяют зажигание основного факела от огневого пояса, создаваемого при выходе небольшой части смеси через кольцевую щель или ряд отверстий у корня факела [81]. Размеры щели или отверстий обычно берут меньше критических, т. е. 1,2—1,5 мм, что предотвращает проскок пламени в кольцевую камеру.

В горелках с закручиванием газозвдушной смеси аэродинамика потока на выходе из горелки обеспечивает появление обратных токов по оси факела и возврат к устью горелки части раскаленных продуктов сгорания.

В случае диффузионного сжигания газа нередко особых мер для стабилизации факела не требуется, так как в процессе турбулентного перемешивания газа с подаваемым воздухом неизбежно создается зона, в которой соотношение газа и воздуха находится в концентрационных пределах воспламенения смеси. Устойчивое горение обеспечивается в том случае, если локальные скорости такой смеси будут не выше турбулентной скорости распространения пламени. При обычно выбираемых скоростях истечения газа и подаваемого в зону горения воздуха указанные условия соблюдаются

Горелочные туннели

Наиболее распространенными устройствами для стабилизации факела, особенно в случае применения инжекционных горелок, являются огнеупорные туннели. В них благодаря наличию внезапного расширения сечения происходит возвратное течение продуктов сгорания по периферии к корню струи и прогрев смеси до температуры, обеспечивающей воспламенение. Благодаря интенсивному горению в туннеле его объемное напряжение может достигать 15—45 Гкал/(м³.ч). Из-за воздействия высокой температуры, развивающейся при горении, стенки туннеля подвергаются постепенному разрушению. Короткие и асимметричные туннели оказываются при этом более стойкими. Однако при чрезмерном укорочении туннеля ослабляется его стабилизирующее действие [87]. Рекомендуются следующие соотношения размеров:

для нормального туннеля с осесимметричными (круглыми) горелками (см. рис. III-29) $D = (2,4 \div 3,0) d_r$, $L = (2,4 \div 2,7) D$;

для плоских (щелевых) инжекционных горелок $F = (6 \div 8) F_r$, $L = (2,4 \div 2,7) H$;

для укороченного туннеля $L = (1,7 \div 2,4) D$, где D и d_r — соответственно диаметры туннеля и горелочной головки, мм; F и F_r — площади сечений туннеля и горелочной головки, м²; L и H — длина и высота туннеля.

Туннели для газогорелочных устройств изготавливают из штучных изделий (огнеупорный кирпич, горелочные камни) или формируют на месте по шаблону, используя магнезитовую, хромомagneзитовую массу и т. п. Из кирпича (чаще всего шамотного) туннели складывают, когда температура в рабочей камере не превышает 1200—1250° С. При более высоких температурах туннели изготавливают из высокоглиноземистого кирпича.

Применение горелочных или огневых камней позволяет значительно увеличить межремонтные сроки газовых установок — до двух лет. Горелочные камни изготавливают из блоков, спрессованных из высокоглиноземистого огнеупорного материала следующего состава, %: наполнитель — бой высокоглиноземистого шамотного кирпича, ГОСТ 1599—53 (крупность наполнителя 0,14—5 мм) — 64; тонкомолотая добавка (фракции < 0,14), полученная при дроблении наполнителя, $\rho = 3,3 \text{ г/см}^3$, — 16,2; цемент высокоглиноземистый ВГ-64 марки 700—800 Подольского опытного завода НИИЦемент — 16,2; вода — 6,6. Кроме того, для изготовления горелочных камней начинают применять новый прогрессивный материал — огнеупорный бетон, из которого получают элементы любых конфигураций и размеров [99]. Применение огнеупорных бетонов выгодно экономически. Внедрение 1 м³ огнеупорного бетона дает экономию в 30—50 руб. при сокращении трудовых затрат на 2—4 чел.-дня.

Набивные туннели изготавливают с помощью шаблона, обычно деревянного. Его делают с некоторым расширением в сторону выхода продуктов сгорания (угол расширения 2—3°). Это необходимо для удобства извлечения шаблона после набивки туннеля. Материалом для набивки служит огнеупорная масса следующих составов, %:

1) порошок хромистого железняка — 45, порошок обожженного магнезита — 45, огнеупорная глина — 10;

2) молотый хромомagneзит — 70, огнеупорная глина — 30, вода (на 1 м³ сухой смеси) — 100 (л);

3) шамот молотый — 75, глина огнеупорная — 15, цемент глиноземистый — 10 (смесь данного состава разбавляют водой с добавлением небольшого количества жидкого стекла).

Стойкость набивных туннелей зависит от соблюдения рецептур, плотности набивки и колеблется в пределах от трех месяцев до нескольких лет. Например, стойкость хромомagneзитовых туннелей 1 год, т. е. выше стойкости шамотной кладки печи.

Качество изготовления всех видов туннелей зависит от правильности проведения их сушки. В первые два-три дня температуру в топке необходимо поддерживать в пределах 100—200° С, а в последующие дни — 200—300° С. Процесс сушки считается законченным, когда температура наружного слоя обмуровки составляет 40—55° С и сохраняется неизменной в течение 1—2 дней.

Рассмотрим некоторые способы воздействия на излучательную способность, температуру и аэродинамические характеристики факела, определяющие конвективную теплоотдачу, с целью регулирования и интенсификации процессов горения и теплообмена.

Реформирование газа

Для получения светящегося пламени, отличающегося от не светящегося тем, что оно излучает тепловую энергию по всему

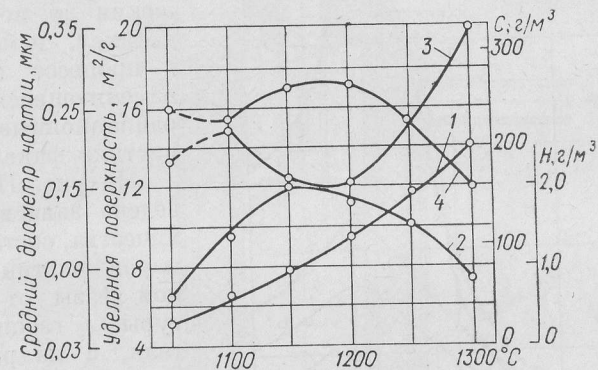


Рис. III-30. Зависимость характеристик дисперсной фазы от температуры газоподогревателя.

1 — содержание C углерода в дисперсной фазе на единицу объема газообразных продуктов разложения; 2 — содержание H водорода в дисперсной фазе на единицу объема газообразных продуктов разложения; 3 — удельная поверхность сажистых частиц; 4 — средний диаметр сажистых частиц.

спектру, а не селективно в пределах полей CO₂ и H₂O, необходимо обеспечить пиролиз CH₄ (основного компонента природных газов), чтобы возникла новая дисперсная фаза — углерод (сажа). При правильном выборе температуры и времени процесса, степени окисленности газовой фазы и других факторов возникшие частицы углерода будут иметь такие размеры, которым свойственно максимальное излучение. Это позволит увеличить теплоотдачу излучением (за счет роста светимости факела), не увеличивая температуры в рабочем пространстве установки, которая нередко лимитируется стойкостью огнеупоров.

Существуют следующие основные пути разложения природного газа:

1) часть газа сжигается в специальных реформационных устройствах, а выделяющееся при этом тепло идет на разложение углеводородов остального газа;

2) газ, не смешанный с воздухом, подается в рабочее пространство печи, где он вначале подвергается термическому разложению за счет тепла разогретой кладки, а затем сгорает.

Первый путь (предварительного реформирования) лучше изучен и чаще применяется на практике. В Московском институте стали и сплавов были проведены исследования, позволившие установить влияние продуктов разложения природного газа на излучение пламени [25, 26, 63]. В этих работах осуществлялся

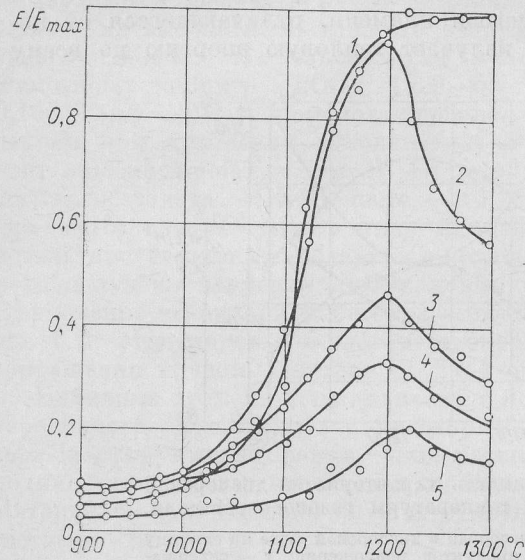


Рис. III-31. Изменение излучения пламени в зависимости от температуры газоподогревателя.

Высота замера: 1 — 3 калибра от среза горелки, 2 — 7, 3 — 11, 4 — 15, 5 — 19.

предварительный подогрев газа, исследовались продукты разложения до поступления в факел, изменение их в процессе горения и изменяющиеся при этом радиационные характеристики факела. Как следует из этих графиков, максимум излучения пламени имеет место при 1150—1200°С, когда частицы углерода имеют наибольший диаметр при максимальном

образовании промежуточных продуктов разложения (они содержат водород) [63]. Подобная связь, указывающая на большое влияние промежуточных соединений на излучение, еще раньше была подмечена К. Руммелем и П. Вэ [141]. Однако до сих пор механизм этого влияния на излучение пламени еще недостаточно изучен.

Наложение на факел электрического поля

Повысить температуру факела с целью интенсификации технологических процессов принципиально можно следующими путями:

- 1) подогревом компонентов горения;
- 2) обогащением дутья кислородом;

3) передачей факелу дополнительного тепла за счет электрической энергии.

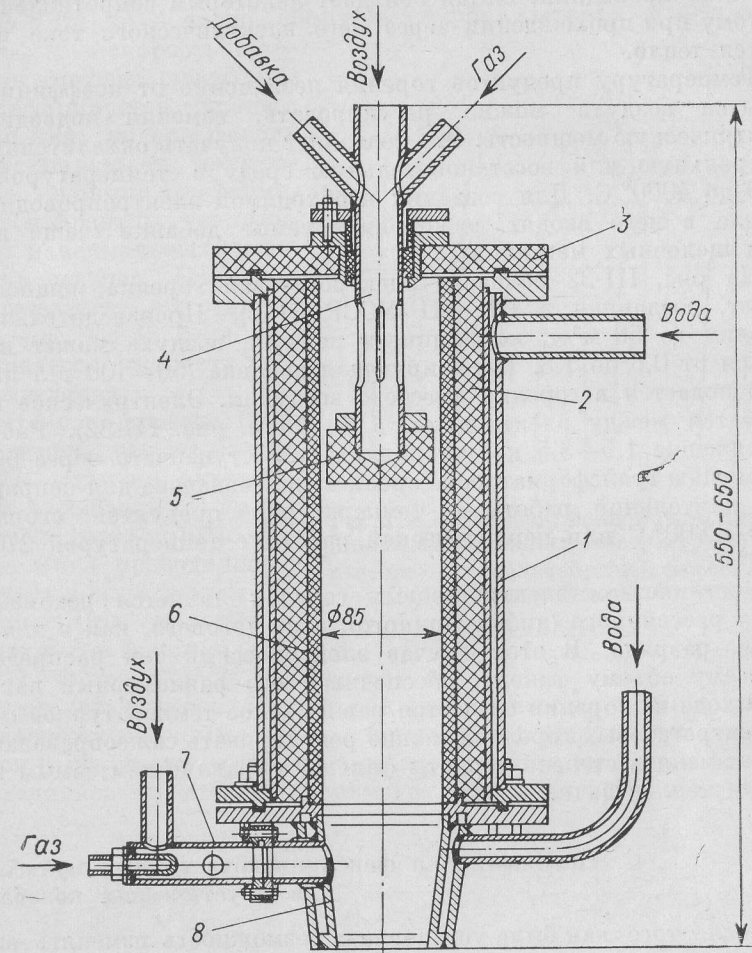


Рис. III-32. Электрогазовая горелка мощностью до 1000 квт. 1 — водоохлаждаемый кожух; 2 — футеровка; 3 — текстолитовый изолятор; 4 — центральный рабочий электрод; 5 — насадка-стабилизатор электрода; 6 — прессованная керамическая трубка; 7 — запальник со свечой; 8 — водоохлаждаемый выходной заземленный электрод.

Увеличение температуры факела за счет подогрева дутья и обогащения его кислородом ограничено вследствие развивающихся процессов диссоциации продуктов сгорания. Большой практический интерес представляет использование для этой цели электрической энергии. Сущность способа заключается в том, что на пламя

природного газа, являющегося слабо ионизированным газом, накладывается электрическое поле высокого напряжения. Как и всякий проводник, пламя обладает некоторым сопротивлением, поэтому при прохождении через него электрического тока выделяется тепло.

Температуру продуктов горения независимо от коэффициента избытка воздуха можно регулировать, изменяя подводимую электрическую мощность. Это позволяет получать окислительную, нейтральную или восстановительную среду с температурой от 1800 до 4000° С. Для создания необходимой электропроводности факела в него вводят легкоионизируемые добавки (чаще всего соли щелочных металлов).

На рис. III-32 показана электрогазовая горелка мощностью 1 Мвт, созданная в ИГ АН УССР [132]. Производительность горелки до 50 м³/ч, коэффициент избытка воздуха может изменяться от 0,6 до 1,8. Ионизирующая добавка (50—100 г/л паров KCl) подается в горелку вместе с воздухом. Электрическое поле создается между электродами 5 и 8 (см. рис. III-32). Рабочее напряжение 1,5—3,5 кв устанавливается ступенчато через 500 в с помощью трансформатора. Горелка предназначена для непрерывной длительной работы с температурой продуктов сгорания 2000—2600° С или периодической работы с температурой 2700—2900° С.

Достоинством электрогазовых горелок является реализация в них рассеянного (диффузионного), а не дугового, как в плазмотроне, разряда. В этом случае электрический ток распределен по всему объему факела, обеспечивая его равномерный нагрев; на выходе из горелки создается равномерное температурное поле. В электрогазовых горелках можно регулировать сажеобразование, т. е. изменять степень черноты факела, управляя тем самым процессом теплоотдачи.

Наложение на факел низкочастотных пульсаций и акустических колебаний

После того как была установлена возможность изменять аэродинамические характеристики турбулентных струй за счет воздействия на них колебаний, создаваемых различными способами [18, 24, 51, 139], стали предприниматься попытки использовать эти колебания для управления процессом горения [14, 66, 67].

О. А. Кузнецов и Л. П. Ярин, исходя из общности процесса тепло- и массообмена в турбулентных газовых струях и факеле [19], провели экспериментальное исследование влияния низкочастотных колебаний скорости, возбуждаемых механическим турбулизатором, на аэродинамические и тепловые характеристики турбулентного газового факела [64]. Турбулизатор позволял изменять частоту интенсивности пульсаций в пределах $0 < f < 200$ гц. Коэффициент избытка воздуха изменялся от 0,8 до 1,25. Опыты

показали, что с увеличением начального уровня пульсаций, косвенной характеристикой которых является число Струхала $Sh = nd/u$ (n — число оборотов турбулизатора, d — диаметр сопла, u — скорость истечения горючей смеси), интенсифицируется процесс смешения, по оси факела резко нарастает температура, заметно деформируется фронт пламени (линии максимальных температур на рис. III-33, а), сокращается его длина (см. рис. III-33, б) и увеличивается скорость тепловыделения.

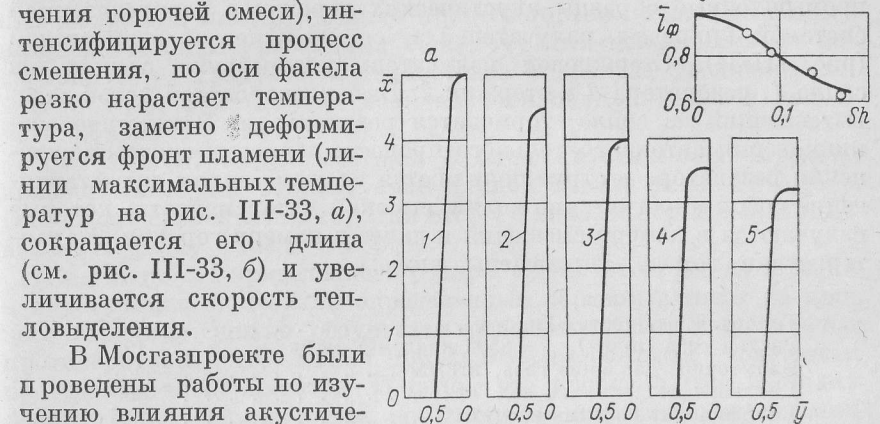


Рис. III-33. Конфигурация фронта пламени (линия максимальных температур) (а) и изменение относительной длины факела \bar{l}_ϕ при различных числах Струхала (б).

$\bar{l}_\phi = (l_\phi)_{Sh} / (l_\phi)_{Sh=0}$. Значения Sh: 1 — 0; 2 — 0,056; 3 — 0,091; 4 — 0,134; 5 — 0,17.

В Мосгазпроекте были проведены работы по изучению влияния акустических колебаний на факел газовых горелок [91]. Исследования проводились с открытым и закрытым факелом. При наложении на открытый факел колебаний с частотой до 21 кгц наблюдалась заметная интенсификация процесса горения; факел по сравнению с обычным видом сокращался, расширялся и раздваивался (имел форму «рыбьего хвоста»). Опыты с закрытым факелом проводились на стенде-калориметре. Газ сжигался с помощью

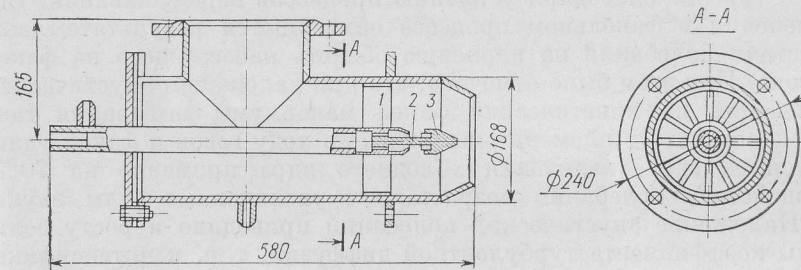


Рис. III-34. Опытная акустическая горелка со стержневым излучателем.

горелки, в торцевой части которой устанавливался акустический стержневой излучатель типа ГСИ-5. За счет механизма поворота лопаток в горелке можно было изменять степень крутки воздуха, идущего на горение. Опыты показали, что наложение акустических

колебаний привело к увеличению теплоотдачи факела в целом на 5,5%. Причем этот эффект увеличивается с ростом степени крутки.

В процессе исследований в Мосгазпроекте были созданы полупромышленные образцы акустических горелок с распределенной системой вихревых излучателей и со стержневым излучателем (рис. III-34). Стержневой излучатель ультразвука состоит из сопла 1, резонатора 3 и стержня 2. Высокоскоростной поток газа, вытекающий из сопла, тормозится резонатором. Вследствие возникновения автоколебательного процесса периодического опорожнения резонатора в струе появляются ударные волны, представляющие собой акустические волны высокой интенсивности, которые излучаются в камеру смешения и далее в камеру горения. Характеристики горелок приведены ниже:

Тепловая мощность, Гкал/ч	1,02
Расход газа (при $Q_{p, n} = 8500$ ккал/м ³), м ³ /ч	120
Избыточное давление газа, кгс/см ²	1,5
Давление воздуха, мм вод. ст.	360
Коэффициент избытка воздуха	1,15
Акустическая мощность излучателя, вт	14
Частота колебаний, кгц	4,7

Испытания горелки показали, что с увеличением нагрузки и мощности акустических колебаний относительные размеры факела уменьшаются.

Подробные исследования механизма воздействия акустических колебаний на процесс турбулентного горения газов были проведены во ВНИИПромгазе [14, 66, 67]. Как следует из этих опытов, обобщенных В. Г. Смоленским [14], в факеле отсутствуют акустические течения, которые, по некоторым гипотезам, интенсифицируют горение благодаря усилению процессов перемешивания. Все изменения в факельном процессе объясняются результатом воздействия колебаний на корневую область набегающего на факел потока. При этом было отмечено, что при наложении акустических колебаний на кинетический факел максимумы выгорания газа и теплоотдачи от пламени смещались по ходу газов и факел удлинялся за счет увеличения холодного ядра примерно на 70%. Воздействие колебаний возрастало с увеличением силы звука.

Наложение акустических колебаний приводило к росту величины коэффициента турбулентной диффузии, т. е. к интенсификации смешения в начальном участке набегающего потока. По этой причине увеличивался путь смеси до воспламенения и длина факела в целом. По А. В. Талантову [41], воспламенение смеси задерживается вследствие понижения температуры в локальном очаге зажигания из-за отвода тепла в набегающий поток.

Акустические колебания с ростом силы звука понижают устойчивость горения к отрыву и увеличивают к проскоку. При некоторой величине силы звука проскок практически полностью

исключается. Частота колебаний заметного влияния на устойчивость пламени не оказывает.

Воздействие акустических колебаний на диффузионный факел характеризуется существенной его интенсификацией за счет увеличения коэффициента турбулентной диффузии, т. е. улучшения смешения, лимитирующего процесс горения неперемешанных потоков. Температура факела около горелки повышается на несколько сотен градусов, а теплоотдача от факела увеличивается в 2—3 раза. Достигнутая величина теплонапряженности топочного объема 14 Гкал/(м³·ч).

Во ВНИИПромгазе созданы 2 типа акустических горелок: инжекционные и с регулируемой длиной факела типа ГРФ [67]. Наиболее перспективны горелки второго типа, которые позволяют изменять длину факела в 2 раза.

Как видно из приведенного обзора, низкочастотные пульсации и акустические колебания определенным образом влияют на процесс горения. Однако результаты отдельных опытов достаточно противоречивы, что может объясняться разными условиями проведения экспериментов. В целом эта проблема еще в стадии лабораторных исследований, а созданные акустические горелки следует рассматривать как опытные. По-видимому, правильно предположение [91], что наиболее перспективным направлением является создание акустических газомазутных горелок, так как интенсификация распыливания жидкого топлива акустическими колебаниями наиболее эффективна.

Областью применения чисто газовых акустических горелок являются небольшие камеры сгорания с близко расположенными к горелкам тепловоспринимающими поверхностями.