

## ИССЛЕДОВАНИЕ ГОРЯЩЕГО ЛАМИНАРНО-ДИФФУЗИОННОГО ГАЗОВОГО ФАКЕЛА

Н. Н. НОРКИН

### I. Введение

Основными формами горения газов при постоянном давлении являются следующие три: 1) факельное ламинарно-диффузионное горение; 2) факельное турбулентно-диффузионное и 3) поверхностное каталитическое (беспламенное) горение.

Первая форма горения может быть осуществлена при соблюдении условий: а) когда истечение газа и воздуха из горелки происходит параллельными или концентрическими слоями; предварительное смешение газа и воздуха в горелках не производится; смешение газового и воздушного потоков происходит в рабочем пространстве тепловой установки (в топке, печи) вследствие молекулярной диффузии компонентов газа и воздуха; б) скорости истечения газа и воздуха из горелки одинаковы, величина их ограничивается пределами ламинарного режима. В результате такой организации процесса горения получается наиболее длинный факел пламени с наиболее равномерным распределением температуры по длине его. При сжигании газа, содержащего значительные количества углеводородов, диффузионный факел обладает наибольшей светимостью и высокой степенью черноты излучения.

Вторая форма—факельное турбулентно-диффузионное горение, являющееся наиболее распространенным в практике, характеризуется следующим: а) смешение газа и воздуха полностью или частично осуществляется в горелке; б) скорости истечения газа и воздуха или горючей смеси достигают значительных величин и находятся в области турбулентного режима. В результате подобного рода организации процесса горения, скорость его зависит от условий смешения газа с воздухом и скоростей истечения.

Третья форма—поверхностное (беспламенное) горение характеризуется тем, что: а) газ и воздух перед поступлением их в горелку предварительно тщательно смешиваются до состояния однородной смеси; б) горючая смесь сжигается на поверхности горелки, имеющей высокую температуру и играющей роль каталитической поверхности.

Указанные три формы горения отличаются одна от другой степенью подготовленности горючей смеси и влиянием диффузионных и кинетических химических факторов на процесс горения. При факельном ламинарно-диффузионном горении определяющими факторами являются диффузионные, при беспламенном каталитическом горении—кинетические хими-

ческие факторы; при обычном пламенном турбулентном горении в большей или меньшей степени влияют и те и другие факторы.

Интерес к исследованию процессов диффузионного горения обусловлен практическими соображениями (возможность получения длинного с равномерной температурой факела пламени) и теоретическим значением, так как при чисто диффузионном горении для теоретического анализа могут быть использованы уравнения математической физики.

Диффузионное горение обычно осуществляется при помощи плоскощелевых или кольцевых горелок. В первом случае из параллельных щелей отдельными потоками вытекают чередующиеся по высоте струи воздуха и газа; во втором случае из труб, вставленных одна в другую, вытекают газ и воздух концентрическими слоями; обычно через внутреннюю трубку—газ, через внешнюю, облегающую—воздух.

Горение газа происходит на поверхности раздела воздушного и газового потоков, эта поверхность является фронтом пламени. К фронту пламени диффундируют горючий газ и кислород воздуха, а образовавшиеся продукты горения диффундируют в окружающую среду. Диффузионное горение большей частью применяется для сжигания газов, содержащих значительные количества углеводородов. При сжигании таких газов методом диффузионного горения образуется светящееся пламя, вследствие выделения сажистого углерода, являющегося продуктом пирогазетического разложения метана и других газообразных углеводородов.

Область практического применения диффузионного горения довольно обширна и многообразна.

Профессор И. И. Китайгородский [4] обращает внимание на особенное значение диффузионного пламени углеводородных газов. Тепловая энергия, излучаемая светящимся пламенем, поглощается не только поверхностью материала (например, стеклом в ваннах печей), но тепловые лучи и непосредственно проникают в жидкий материал.

Ряд практических достоинств диффузионного горения отмечает Хепборн [19] в обзорной статье, приводя описание многих тепловых установок диффузионного горения.

В литературе опубликовано небольшое число экспериментально-теоретических исследований, посвященных преимущественно определению длины диффузионного факела. Одной из первых попыток в этом отношении является опубликованная в 1934 г. работа Н. С. Махова [9], целью которой ставилась разработка теории простейшей газовой горелки. Затем в 1940 г. Н. С. Махов разработал приближенную теорию диффузионного пламени, основанную на аналогии уравнений диффузии и теплопередачи [10], взяв за основу решение Нуссельта-Гребера относительно среднего температурного напора в ламинарном потоке [18]. Н. С. Махов провел опыты по изучению диффузионного горения, исследовав в качестве горючего доменный газ. Опыты, в основном, подтвердили его приближенную теорию, хотя условия экспериментирования не отличались тщательностью.

В 1936 г. Г. П. Иванцов [2] предложил решение дифференциального уравнения диффузии применительно к истечению плоско-параллельных потоков, сформулировав соответствующим образом условия для фронта пламени; в дальнейшем нами использовано решение Г. П. Иванцова при исследовании плоско-параллельного факела и высказаны определённые суждения о преимуществах метода Г. П. Иванцова. Экспериментальных исследований, подтверждающих метод решения (насколько нам известно), Г. П. Иванцов не проводил.

Бурке и Шуман [17] опубликовали теоретико-экспериментальное исследование, посвящённое вопросу о расчете длины и форме диффузионного факела. Сформулировав определённым образом начальные и граничные условия, они дали решение дифференциального уравнения диффузии,

позволяющее определять длину факела в зависимости от основных факторов, характеризующих явление диффузии, как-то: от коэффициента диффузии, скорости истечения, определяющих размеров воздушного и газового потоков. В опытах Бурке и Шумана применялись такие горючие смеси: метан-воздух, водород-воздух, окись углерода-воздух, метан-азот-воздух; сжигание их производилось при помощи плоско-параллельных и трубчатых горелок. Ими также исследовалось влияние предварительного подогрева газа и воздуха на длину диффузионного факела. Можно считать, что предложенное ими решение диффузионного факела нашло подтверждение в их опытах. К недостаткам теоретико-экспериментального исследования Бурке и Шумана следует отнести: а) сложность расчета; б) опыты проведены для смесей при низких коэффициентах избытка воздуха  $\alpha = 0,4 - 0,6$ ; в) выходные скорости потоков малые (0,15 м/сек) и не всегда одинаковые; г) анализ газов по длине факела не производился.

В. Ф. Копытов и В. К. Иванов, реферируя теоретико-экспериментальную работу Бурке и Шумана и используя их метод решения диффузионного факела, более отчетливо сформулировали зависимость формы диффузионного факела от коэффициента избытка воздуха. Затем в их работе приведено краткое описание опытной печи, построенной в печной лаборатории ЦНИИМаш, оборудованной трубчатой диффузионной горелкой; печь отапливалась городским газом. Однако, Копытов и Иванов не сделали попытки к тому, чтобы теоретически определить длину диффузионного факела и сопоставить с практически наблюдаемой [6].

В разобранных выше работах диффузионный факел пламени изучался непосредственно путем сжигания газа. Но так как в диффузионном горении решающее значение имеет степень перемешивания газа и воздуха по длине факела, то вполне уместным является применение метода моделирования. Этот метод применен в 1939 г. Д. Н. Ляховским [7].

Д. Н. Ляховский моделировал диффузионный процесс, выявляя степень перемешивания холодного и нагретого воздуха, вытекавших в виде плоско-параллельных потоков; критерием для суждения о степени перемешивания потоков служило измерение температуры. Д. Н. Ляховский не обрабатывал результатов своих исследований в плане решения уравнений диффузии, но результаты его исследований могут быть использованы для ориентировочного суждения о длине пути факела при той или иной степени перемешивания.

К этой же категории экспериментальных исследований следует отнести работы Д. Н. Ляховского и Сыркина [8], Ф. П. Казакевича и Н. П. Дюндина [3], М. А. Глинкова и Н. А. Калошина [1], П. И. Сычева [13] К. Румеля [21].

Методика экспериментирования, применявшаяся при такого рода исследованиях, обычно состояла в том, что производилось измерение скоростных и температурных полей потоков холодного и подогретого воздуха, вытекающих из насадков, оси которых параллельны.

При помощи подобного рода опытов определяется влияние на процесс перемешивания направления потоков, соотношения скоростей потоков, конфигурации факела и т. д.

Опубликован также ряд экспериментальных работ, посвященных вопросу о перемешивании потоков в процессе горения, но характер обстановки опытов не преследовал цели изучения диффузионного горения и результаты исследований не обрабатывались в плане применения теории и уравнений диффузии.

Подобного рода исследования обычно проводились по следующей методике: в лабораторных газовых печах сжигается газ, подводимый отдельно от воздуха, измеряются скоростные, температурные и концентрационные поля в горящем факеле. В результате получается представление об ин-

тенсивности перемешивания газа и воздуха, о выгорании газа, о распределении температуры по длине факела.

Из наиболее обстоятельных работ в этой области следует отметить работы: Пистора [20], Руммеля [21], В. Н. Тимофеева и П. И. Сычева [14], Л. В. Подгурского [12] и др. Вопросы о взаимной связи различных форм горения и о влиянии аэродинамических факторов на организацию факела горения освещены в работе автора [11].

При наших исследованиях диффузионного горения мы ставили следующие цели: во-первых, выполнить более или менее всесторонне освещение вопроса о диффузионном горении, т. е. о длине диффузионного факела, распределении температуры по длине его и составе продуктов горения; к сожалению, по ряду причин явление теплопередачи диффузионного факела детальному исследованию не подвергалось, и этот вопрос лишь ориентировочно затронут; во-вторых, подвергнуть детальному разбору физико-математические теории диффузионного факела и сопоставить полученные экспериментальные данные с расчетными; это позволит каждому читателю составить ясное представление об условиях применения той или иной теории и о степени отклонения опытных данных от расчетно-теоретических; в-третьих, сделать попытку в выявлении степени влияния неодинаковых скоростей истечения газа и воздуха на чисто диффузионный процесс, так как совершенно очевидно, что практическое осуществление основного условия диффузионного процесса  $w = idem$  довольно затруднительно.

В связи с поставленными задачами исследование диффузионного горения выполнено при сжигании светильного и водяного газов с помощью плоско-щелевых и трубчатых горелок.

Работа выполнялась в лаборатории тепловой аппаратуры химико-технологического факультета Томского политехнического института. В работе принимали участие в разное время сотрудники кафедры: В. В. Сигова, А. А. Стариков, Н. Д. Вылегжанин, Г. Д. Специ, Т. Я. Ваганова.

## II. Уравнения процесса диффузии в плоско-параллельных и концентрических слоях

Нестационарный процесс диффузии математически может быть выражен уравнением, в котором концентрация диффундирующих веществ, как функция, зависит от координаты времени и координат пространства, взятых в качестве независимых переменных, т. е.

$c = f(\tau, x, y, z)$ —в декартовых координатах и  
 $c = f(\tau, r, \psi, z)$ —в цилиндрических координатах.

Для одномерного концентрационного поля

$c = f(\tau, x)$  или

$c = f(\tau, r)$ .

Из математической физики известно, что процесс распределения и выравнивания концентраций в нестационарном одномерном концентрационном поле описывается дифференциальным уравнением Фика в декартовых координатах

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} = K \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (1)$$

и в цилиндрических координатах

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} = K \left( \frac{\partial^2 c}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial c}{\partial r} \right). \quad (2)$$

В этих уравнениях обозначены:  $c$  — концентрация компоненты горючего газа в любой точке поля;  $\tau$  — время диффузии;  $K$  — коэффициент диффузии;  $x$  — пространственная координата в направлении диффузии;  $r$  — радиальная координата.

Для нахождения вида функции  $c = f(\tau, x)$  или  $c = f(\tau, r)$  необходимо, чтобы: а) функция удовлетворяла дифференциальному уравнению, б) соответствовала заданным поверхностным условиям и в) при  $\tau = 0$  давала бы требуемое начальное распределение концентраций.

Уравнение (1) применяется для исследования диффузии в плоско-параллельных слоях и уравнение (2) применяется для исследования диффузии в концентрических слоях.

Для исследования явления диффузии в плоско-параллельных слоях представим следующую схему истечения потоков. Через внутреннюю щель проходит газ и через две наружные щели — воздух. Выберем такую прямоугольную систему координат, чтобы плоскость  $yz$  проходила через середину газового слоя, тогда ось  $ox$  в каждой точке будет перпендикулярна к поверхностям газового и воздушного слоев. Сказанное изображено на рис. 1.

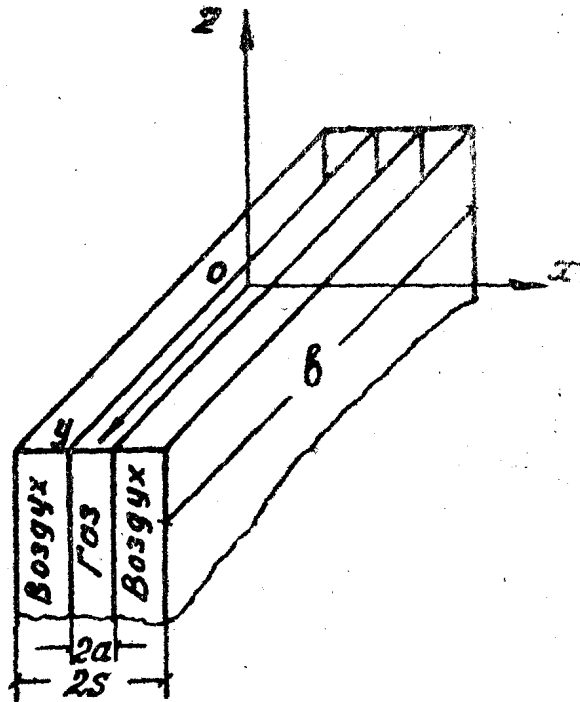


Рис. 1. Схема истечения плоско-параллельных слоев

**Математическая формулировка задачи:**

В начальный момент времени при  $\tau = 0$  распределение концентрации газа, выраженной через парциальные давления его, определяется функцией

$$(p_A)_{\tau=0} = f(x),$$

$$\text{при } a > x > 0$$

$$(p_A)_{\tau=0} = 1,$$

$$\text{и при } s > x > a$$

$$(p_A)_{\tau=0} = 0.$$

Пространственные условия  $\left(\frac{\partial p_A}{\partial x}\right)_{x=0} = 0$  и

$$\left(\frac{\partial p_A}{\partial x}\right)_{x=s} = 0.$$

Дифференциальное уравнение диффузии газа  $A$  будет иметь вид

$$\frac{\partial p_A}{\partial \tau} = K_A \frac{\partial^2 p_A}{\partial x^2} \quad (1')$$

Решение уравнения (1') должно удовлетворять дифференциальному уравнению и условиям на поверхности, оно выполнено Г. П. Иванцовым [2] для вышеуказанных начальных и граничных условий:

$$p_A = \frac{1}{2} c_0 + \sum_{n=1}^{\infty} c_n \cos \left( n \pi \frac{x}{s} \right) e^{-\left( \frac{n \pi}{2} \right)^2 \frac{K \tau}{s^2}} \quad (3)$$

или

$$p_A = \frac{1}{2} c_0 + c_1 \cos \left( \pi \frac{x}{s} \right) e^{-\left( \frac{\pi}{2} \right)^2 \frac{K \tau}{s^2}} + c_2 \cos \left( 2 \pi \frac{x}{s} \right) e^{-\left( \frac{2 \pi}{2} \right)^2 \frac{K \tau}{s^2}} + \\ + c_3 \cos \left( 3 \pi \frac{x}{s} \right) e^{-\left( \frac{3 \pi}{2} \right)^2 \frac{K \tau}{s^2}} + \dots \quad (4)$$

Это уравнение характеризует изменение парциального давления газа  $A$  в нестационарном концентрационном поле.

При  $\tau=0$  члены  $e$  экспон = 1 и тогда полученный тригонометрический ряд представляет собою уравнение концентраций газа  $A$  в начальный момент, с предельными значениями  $p_A = 1$  при  $a > x > 0$  и  $p_A = 0$  при  $s > x > a$ .

По правилам гармонического анализа вычисляются коэффициенты  $c_0, c_m$ .

$$\frac{1}{2} c_0 = \frac{1}{2s} \int_0^{2s} f(x) dx = \frac{1}{2s} 2 \int_0^a dx = \frac{2a}{2s} = \frac{a}{s}, \quad (5)$$

$$c_m = \frac{1}{s} \int_0^{2s} f(x) \cos \left( m \pi \frac{x}{s} \right) dx = \frac{1}{s} 2 \int_0^a \cos \left( m \pi \frac{x}{s} \right) dx = \\ = \frac{2}{s} \cdot \frac{s}{m \pi} \sin \left( m \pi \frac{a}{s} \right) = \frac{2}{m \pi} \sin \left( m \pi \frac{a}{s} \right). \quad (6)$$

Следовательно,

$$c_1 = \frac{2}{\pi} \sin \left( \frac{\pi a}{s} \right), \\ c_2 = \frac{1}{\pi} \sin \left( \frac{2 \pi a}{s} \right), \\ c_3 = \frac{2}{3 \pi} \sin \left( \frac{3 \pi a}{s} \right) \text{ и т. д.}$$

После подстановки коэффициентов  $c_0, c_1, c_2, c_3 \dots$  в характеристическое решение (4) получится уравнение изменения парциального давления газа  $A$  в процессе диффузии:

$$p_A = \frac{a}{s} + \frac{2}{\pi} \sin \left( \pi \frac{a}{s} \right) \cos \left( \pi \frac{x}{s} \right) e^{-\left( \frac{\pi}{2} \right)^2 \frac{K \tau}{s^2}} + \\ + \frac{1}{\pi} \sin \left( 2 \pi \frac{a}{s} \right) \cos \left( 2 \pi \frac{x}{s} \right) e^{-\pi^2 \frac{K \tau}{s^2}} + \\ + \frac{2}{3 \pi} \sin \left( 3 \pi \frac{a}{s} \right) \cos \left( 3 \pi \frac{x}{s} \right) e^{-\left( \frac{3 \pi}{2} \right)^2 \frac{K \tau}{s^2}} + \dots \quad (7)$$

При  $x=0$  получится следующее уравнение изменения парциального давления во времени в середине газового слоя

$$(p_A)_{x=0} = \frac{a}{s} + \frac{2}{\pi} \sin \left( \pi \frac{a}{s} \right) e^{-\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \frac{K\tau}{s^2}} + \frac{1}{\pi} \sin \left( 2\pi \frac{a}{s} \right) e^{-\pi^2 \frac{K\tau}{s^2}} + \frac{2}{3\pi} \sin \left( 3\pi \frac{a}{s} \right) e^{-\left(\frac{3}{2}\pi\right)^2 \frac{K\tau}{s^2}} + \dots \quad (8)$$

Если считать, что диффузионный факел имеет постоянную поступательную скорость движения  $w$ , то за время диффузии  $\tau$  путь, пройденный газовым потоком, или что то же самое, длина факела будет  $z = w\tau$ .

Подставив значение  $\tau = \frac{z}{w}$  в уравнение (8), получим

$$(p_A)_{x=0} = \frac{a}{s} + \frac{2}{\pi} \sin \left( \pi \frac{a}{s} \right) e^{-\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \frac{Kz}{ws^2}} + \frac{1}{\pi} \sin \left( 2\pi \frac{a}{s} \right) e^{-\pi^2 \frac{Kz}{ws^2}} + \frac{2}{3\pi} \sin \left( 3\pi \frac{a}{s} \right) e^{-\left(\frac{2}{3}\pi\right)^2 \frac{Kz}{ws^2}} + \dots \quad (9)$$

Это уравнение для процесса диффузии в плоскопараллельных слоях было выведено, как уже указывалось ранее, Иванцовым [2]. Из уравнения можно вычислить длину диффузионного факела  $z$  по заданной степени завершенности диффузии, проверяемой путем газового анализа по длине факела.

Полагая  $\tau$  равным бесконечно большой величине,  $(p_A)_{x=0}$  в конечной точке факела

$$(p_A)_{x=0} = \frac{a}{s}. \quad (10)$$

Но величина  $\frac{a}{s}$  для процесса диффузионного горения определенным образом связана с количеством воздуха, необходимого для сжигания газа.

Установим соотношение между размерами воздушной и газовой щелей, исходя из следующих условий, характерных для диффузионного горения:

а) пусть скорости истечения газа и воздуха равны и находятся в пределах ламинарного режима, т. е.

$$w_{\text{газ}} = w_{\text{возд}},$$

$$Re_{\text{газ}} < 2320,$$

$$Re_{\text{возд.}} < 2320;$$

б) сжигание газа должно происходить при некотором избытке воздуха коэффициент избытка воздуха  $\alpha > 1$ , т. е. на  $m^3$  газа требуется воздуха

$$V_{\text{воздух}} = \alpha V_0.$$

Тогда при поперечном сечении воздушной щели  $F_{\text{в.щ.}}$  и газовой щели  $F_{\text{г.щ.}}$

$$\frac{V_{\text{возд.}}}{F_{\text{в.щ.}}} = w_{\text{в}} = w_{\text{г}} = \frac{1}{F_{\text{г.щ.}}}$$

или

$$\frac{\alpha V_0}{F_{в.ш.}} = \frac{1}{F_{г.ш.}}; \quad \frac{F_{в.ш.}}{F_{г.ш.}} = \alpha V_0,$$

но

$$F_{в.ш.} = (2s - 2a)b = 2(s - a)b,$$

$$F_{г.ш.} = 2ab.$$

Следовательно,

$$\frac{2(s - a)b}{2ab} = \alpha V_0$$

или

$$\frac{s - a}{a} = \alpha V_0. \quad (11)$$

Из уравнения (11) следует, что чем больше теоретически необходимое количество воздуха, а значит и чем выше теплотворная способность газа, тем больше отношение ширины воздушных щелей к газовой при сжигании газа с тем же коэффициентом избытка воздуха.

Из уравнения (11)  $\frac{s - a}{a} = \alpha V_0$  следует, что  $\frac{a}{s} = \frac{1}{1 + \alpha V_0}$ , поэтому

$$(p_A)_{\substack{x=0 \\ \tau=\infty}} = \frac{1}{1 + \alpha V_0} \quad (10')$$

Введем понятие о коэффициенте степени завершения диффузии  $E$ , определив его как отношение количества продиффундировавшего газа на данное время к предельно возможному количеству его, т. е.

$$E = \frac{1 - (p_A)\tau}{1 - (p_A)_{\tau=\infty}}$$

Подставив значение  $(p_A)_{\substack{x=0 \\ \tau=\infty}}$ , получим

$$E = \frac{1 - (p_A)\tau}{1 - \frac{1}{1 + \alpha V_0}} \quad (12)$$

По этому уравнению, задаваясь величиной степени завершенности диффузии  $E$  для определенных значений  $\alpha$  и  $V_0$ , определяем  $(p_A)\tau$  и по уравнению (9)—длину диффузионного факела  $z$ , соответствующую величине степени завершенности диффузии, или по наблюдаемой длине факела определяем степень завершенности диффузии.

В дальнейшем уравнения (9) и (11) использованы нами при математической обработке экспериментальных данных наблюдений длины диффузионного факела. Насколько нам известно, в литературе не имеется опытных данных, при помощи которых было бы проверено предложенное Г. П. Иванцовым решение уравнения диффузии применительно к горению газов.

Иной метод решения дифференциального уравнения диффузии предложен Бурке и Шуманом [17], в соответствии с иными начальными и граничными условиями.

Определяя фронт пламени как поверхность, на которой в результате горения концентрация горючего равна нулю, Бурке и Шуман сводят сложный вопрос взаимной диффузии газа в воздух и воздуха в газ к простому явлению—к диффузии одного лишь горючего газа.



Если обозначить  $c$  — концентрацию горючего газа в любой точке факела,  $c_1$  — начальную концентрацию горючего газа,  $c_2$  — начальную концентрацию кислорода в воздухе,  $i$  — число объемов кислорода, потребного для горения одного объема газа,  $\frac{c_2}{i}$  — число объемных долей кислорода, эквивалентное одному объему горючего газа, рассматриваемое как отрицательный горючий газ, тогда задача решения уравнения диффузии формулируется следующим образом: горючий газ с начальной концентрацией в исходной смеси  $c_1$  диффундирует в кислород, взятый в эквивалентном количестве —  $\frac{c_2}{i}$ ; начальные условия:

$$\begin{aligned} & \left. \begin{array}{l} \text{при } \tau = 0 \\ a > x > 0 \end{array} \right\} c = c_1, \\ \text{и} & \left. \begin{array}{l} \text{при } \tau = 0 \\ s > x > a \end{array} \right\} c = -\frac{c_2}{i}. \end{aligned}$$

Решение, удовлетворяющее дифференциальному уравнению диффузии и начальным и граничным условиям для плоскопараллельных слоев, будет:

$$c = c_0 \frac{a}{s} - \frac{c_2}{i} + \frac{2}{\pi} c_0 \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{1}{n} \sin \frac{n \pi a}{s} \cos \frac{n \pi x}{s} e^{-\frac{Kn^2 \pi^2}{ws^2} z}. \quad (13)$$

Здесь  $c_0 = c_1 + \frac{c_2}{i}$ .

Во фронте пламени  $c = 0$ , тогда

$$E = \frac{\pi}{2} \left( \frac{c_2}{ic_0} - \frac{a}{s} \right) = \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{1}{n} \sin \frac{n \pi a}{s} \cos \frac{n \pi x}{s} e^{-\frac{Kn^2 \pi^2}{ws^2} z}. \quad (14)$$

Характеристический параметр решения дифференциального уравнения диффузии  $E$  может иметь нулевое, положительное и отрицательное значение:

$$\text{при } \frac{c_2}{ic_0} = \frac{a}{s} \quad \text{значение } E = 0,$$

$$\text{при } \frac{c_2}{ic_0} > \frac{a}{s} \quad \text{значение } E > 0,$$

$$\text{при } \frac{c_2}{ic_0} < \frac{a}{s} \quad \text{значение } E < 0.$$

Выразим  $\frac{c_2}{ic_0}$  и  $\frac{a}{s}$  через теоретически необходимое количество воздуха и коэффициент избытка воздуха в условиях диффузионного горения.

Пусть для сжигания 1 объема горючего требуется  $i$  объемов кислорода и соответственно  $\frac{i}{c_2}$  объемов воздуха, рассчитываемых по стехиометрическим уравнениям реакций горения. Если концентрация горючего  $c_1$ , то для сжигания 1 объема газа теоретически необходимое количество воздуха составит

$$V_0 = \frac{i}{c_2} c_1.$$

Действительное количество воздуха для горения равно

$$\alpha V_0 = \alpha \frac{i}{c_2} c_1. \quad (15)$$

Для соблюдения условий диффузионного горения согласно уравнению (11)

$$\frac{s-a}{a} = \alpha V_0.$$

Из сопоставления (11) и (15) следует, что

$$\alpha \frac{i}{c_2} c_1 = \frac{s-a}{a}$$

или

$$\frac{a}{s} = \frac{c_2}{c_2 + \alpha i c_1}. \quad (16)$$

Если  $\alpha = 1$ , то  $\frac{a}{s} = \frac{c_2}{c_2 + i c_1} = \frac{c_2}{i c_0}$  и  $E = 0$ .

Если  $\alpha > 1$ , то  $\frac{a}{s} > \frac{c_2}{i c_0}$  и  $E > 0$ .

Если  $\alpha < 1$ , то  $\frac{a}{s} < \frac{c_2}{i c_0}$  и  $E < 0$ .

Итак, знак для  $E$  зависит от коэффициента избытка воздуха, но это в конечном счете определяет форму диффузионного факела. Если  $E = 0$ , то вертикальная проекция факела будет иметь прямоугольную форму, если  $E > 0$ , то проекция факела будет иметь приближенно форму равнобедренного треугольника высотой  $z$  с вершиной при  $x = 0$ , и если  $E < 0$ , то проекция факела будет иметь приближенно форму трапеции с наибольшим верхним основанием на высоте  $z$  при  $x = s$ .

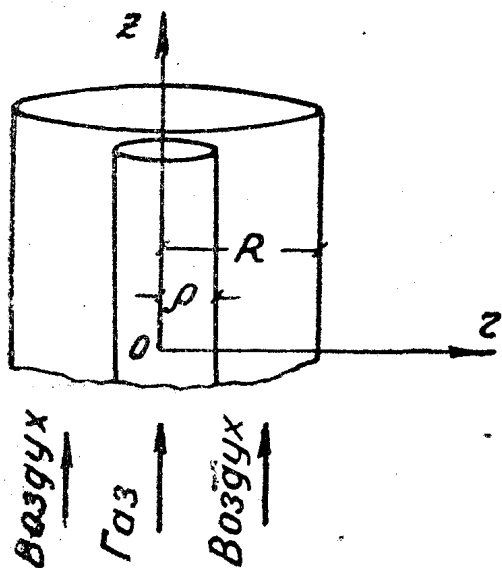


Рис. 2. Схема истечения концентрических слоев

В дальнейшем уравнения (16), (14) использованы нами для вычисления теоретической длины диффузионного факела при обработке экспериментальных данных, полученных при исследовании диффузионного плоско-параллельного факела.

Для исследования концентрического диффузионного факела возьмем уравнение процесса диффузии, выраженное в цилиндрических координатах

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} = K \left( \frac{\partial^2 c}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial c}{\partial r} \right).$$

Схема истечения концентрических слоев изображена на рис. 2.

Установим соотношение между размерами газовой и воздушной трубок, исходя из следующих условий:

а) пусть скорости истечения газа и воздуха равны и находятся в пределах ламинарного режима, т. е.

$$\begin{aligned} w_{\text{газ}} &= w_{\text{возд.}}, \\ Re_{\text{газ}} &< 2320, \\ Re_{\text{возд.}} &< 2320; \end{aligned}$$

б) сжигание газа должно происходить при некотором избытке воздуха, коэффициент избытка воздуха  $\alpha > 1$ , т.е. на 1 м<sup>3</sup> газа требуется воздуха

$$V_{\text{возд.}} = \alpha V_0,$$

тогда при поперечном сечении воздушной трубки  $F_{\text{в.т.}}$  и газовой трубки  $F_{\text{г.т.}}$

$$\frac{w_{\text{возд.}}}{F_{\text{в.т.}}} = w_s = w_r = \frac{1}{F_{\text{г.т.}}},$$

или

$$\frac{\alpha V_0}{F_{\text{в.т.}}} = \frac{1}{F_{\text{г.т.}}}, \quad \frac{F_{\text{в.т.}}}{F_{\text{г.т.}}} = \alpha V_0,$$

но

$$F_{\text{в.т.}} = \pi (R^2 - \rho^2),$$

$$F_{\text{г.т.}} = \pi \rho^2,$$

следовательно,

$$\frac{\pi (R^2 - \rho^2)}{\pi \rho^2} = \alpha V_0 = \frac{R^2 - \rho^2}{\rho^2} = \frac{R^2}{\rho^2} - 1. \quad (17)$$

Из уравнения следует, что чем выше теплотворная способность газа, тем больше отношение  $\frac{R}{\rho}$ .

Определяя фронт пламени как поверхность, на которой в результате горения концентрация горючего равна нулю, Бурке и Шуман формулируют начальные и граничные условия следующим образом:

$$\left. \begin{array}{l} \text{при } \tau = 0 \\ \text{и} \\ \rho > r > 0 \end{array} \right\} c = c_1,$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{при } \tau = 0 \\ \text{и} \\ R > r > \rho \end{array} \right\} c = -\frac{c_2}{i},$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{и при } r = 0 \\ r = R \end{array} \right\} \frac{dc}{dr} = 0.$$

Если выразим время диффузии через длину и скорость диффузионного факела и предположим, что на всем протяжении факела скорость перемещения его остается постоянной

$$\begin{aligned} z &= w \tau, \\ d\tau &= \frac{1}{w} dz, \end{aligned}$$

тогда дифференциальное уравнение диффузии примет вид:

$$\frac{\partial c}{\partial z} = \frac{K}{w} \left( \frac{\partial^2 c}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial c}{\partial r} \right). \quad (18)$$

Характеристическое решение дифференциального уравнения, удовлетворяющее начальным и граничным условиям, выведенное Бурке и Шуманом с помощью цилиндрических функций Бесселя, имеет вид:

$$c = c_0 \frac{\rho^2}{R^2} - \frac{c_2}{i} + 2 \frac{\rho c_0}{R^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\mu_n} \cdot \frac{I_1(\mu_n \rho) I_0(\mu_n r)}{[I_0(\mu_n R)]^2} e^{-\frac{K \mu_n^2 z}{w}}. \quad (19)$$

В этом уравнении

$c$  — переменная концентрация горючего в любой точке  $(r, z)$  нестационарного концентрационного поля;

$c_0 = c_1 + \frac{c_2}{i}$ , т. е. сумма эквивалентных начальных концентраций горючего и кислорода воздуха;

$I_0$  — функция Бесселя первого рода и нулевого порядка;

$I_1$  — функция Бесселя первого рода и первого порядка;

$\mu_n$  — положительные корни трансцендентного уравнения,

$I_1(\mu_n R) = 0$  при значении  $n$  от 1 до бесконечности.

Для поверхности фронта пламени, где  $c = 0$ , уравнение (19) примет вид:

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\mu_n} \cdot \frac{I_1(\mu_n \rho) I_0(\mu_n r)}{[I_0(\mu_n R)]^2} e^{-\frac{K \mu_n^2 z}{w}} = \frac{R^2 c_2}{2 \rho i c_0} - \frac{\rho}{2} = E. \quad (20)$$

Характеристический параметр  $E$  может иметь положительное, отрицательное и нулевое значение в зависимости от коэффициента избытка воздуха. Чтобы убедиться в этом, выразим значение  $c_2$  и  $c_0$  через теоретически необходимый для горения объем воздуха и коэффициент избытка воздуха.

Пусть для сжигания 1 объема газа требуется  $i$  объема кислорода и соответственно  $\frac{i}{c_2}$  объемов воздуха. Если концентрация горючего газа  $c_1$ , то для сжигания единицы объема газа потребуется теоретически необходимый объем воздуха

$$V_0 = c_1 \frac{i}{c_2}.$$

Действительное количество воздуха составит:

$$\alpha V_0 = \alpha \frac{i}{c_2} c_1,$$

но согласно уравнению (17)

$$\alpha V_0 = \frac{R^2}{\rho^2} - 1.$$

Сопоставляя предыдущие равенства, получим:

$$\alpha \frac{i}{c_2} c_1 = \frac{R^2}{\rho^2} - 1.$$

В уравнении для  $E$  (20) умножим числителя и знаменателя первого члена на  $\rho$ , тогда:

$$E = \frac{R^2 c_2}{2 \rho i c_0} \cdot \frac{\rho}{\rho} - \frac{\rho}{2}$$

Подставим значение  $c_0 = c_1 + \frac{c_2}{i}$  и после несложных преобразований

получим:

$$E = \frac{\rho}{2} \left[ \frac{V_0 (\alpha - 1)}{V_0 + 1} \right] \quad (21)$$

Из этого уравнения видно, что знак для  $E$  определяется коэффициентом, избытка воздуха; если  $\alpha = 1$ , то  $E = 0$ , т. е. при горении с теоретически необходимым количеством воздуха; если  $\alpha > 1$ , то  $E > 0$  (положительное значение) при горении с избыточным количеством воздуха; если  $\alpha < 1$ , то  $E < 0$  (отрицательное значение) при горении с недостатком воздуха.

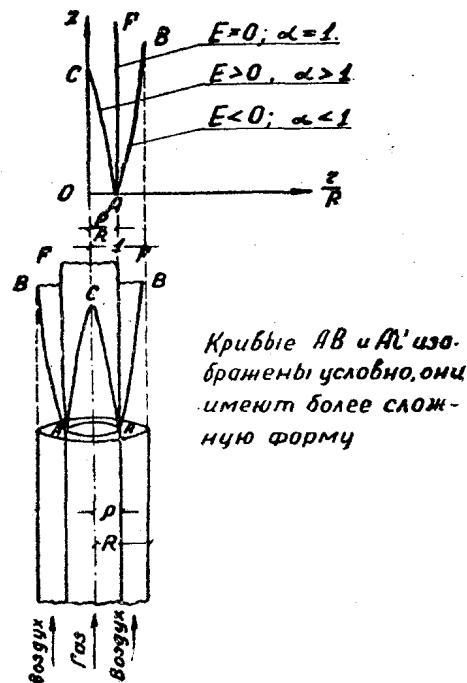
Путем частных решений можно убедиться, что если знак для  $E$  будет минус, т. е. при горении с недостатком воздуха, то фронт факела, возникший у устья внутренней газовой трубки на поверхности раздела газового и воздушного потоков, затем расширяется и заканчивается на радиальном расстоянии  $r = R$  (кривая  $AB$  на рис. 3); если знак для  $E$  будет плюс, т. е. при горении с избытком воздуха, то фронт факела, возникший у устья внутренней газовой трубки на поверхности раздела газового и воздушного потоков, сужается и заканчивается на радиальном расстоянии  $r = 0$  (кривая  $AC$  на рис. 3); если  $E = 0$ , то фронт факела будет иметь цилиндрическую форму (прямая  $AF$  на рис. 3).

На рис. 3 изображена схема формы диффузионного факела в зависимости от коэффициента избытка воздуха. Для построения кривых ось ординат  $oz$  направлена по оси газовой трубки, ось абсцисс  $or$  — по радиусу. На оси абсцисс отложено относительное расстояние  $\frac{r}{R}$  от оси газовой трубки, на оси ординат — длина диффузионного факела (условно).

Кривые  $AB$  и  $AC$  в действительности имеют более сложную форму, однако

при  $E > 0$  точка  $C$  имеет  $\frac{r}{R} = 0$  и при  $E < 0$  точка  $B$  имеет  $\frac{r}{R} = 1$ .

В каждом конкретном случае длина диффузионного факела расчетным путем определяется из уравнения (20), причем, если диффузионный факел расширяющийся к концу, т. е. при горении с недостатком воздуха (кривая  $AB$  на рис. 3), то максимальная длина факела  $z_{max}$  определяется из условия  $\frac{r}{R} = 1$ ; если диффузионный факел сужающийся к концу, т. е. при горении с избытком воздуха (кривая  $AC$  на рис. 3), то максимальная



Кривые  $AB$  и  $AC$  условно изображены, они имеют более сложную форму

Рис. 3. Схема формы диффузионного факела в зависимости от коэффициента избытка воздуха

длина факела  $z_{max}$  определяется из условия  $\frac{z}{R} = 0$ . При горении с теоретически необходимым количеством воздуха, когда диффузионный факел имеет цилиндрическую форму, длина факела определяется степенью завершения процесса диффузии.

В отличие от метода Бурке и Шумана для анализа трубчатого диффузионного факела Н. С. Махов [10] предложил приближенную теорию диффузионного факела, основанную на аналогии законов диффузии и конвективной теплопередачи в ламинарном потоке в условиях внутренней задачи. Для этой цели Н. С. Махов использовал решение Нуссельта-Гребера [18] для среднего температурного напора в любом сечении потока, ламинарно движущегося в трубе

$$\frac{\bar{\vartheta}}{\vartheta_0} = 0,821 e^{-14,63 \frac{1}{Pe} \cdot \frac{z}{d}} + 0,0987 e^{-88,7 \frac{1}{Pe} \cdot \frac{z}{d}} + 0,0135 e^{-212,2 \frac{1}{Pe} \cdot \frac{z}{d}} + \dots \quad (22)$$

В этом уравнении  $\vartheta_0$  — температурный напор в начальном сечении;  $\bar{\vartheta}$  — средний температурный напор в данном сечении;  $d$  — диаметр трубы;  $z$  — расстояние рассматриваемой точки от начального сечения;  $\bar{Pe} = \frac{wd}{a}$  — усредненный критерий подобия Пекле;  $w$  — средняя скорость потока в трубе;  $a$  — коэффициент температуропроводности.

При условии, что коэффициент температуропроводности  $a$  и коэффициент диффузии  $K$  равны между собою, температурное поле и поле концентрации описываются одним и тем же уравнением, в соответствии с чем уравнение для изменения средней концентрации  $\bar{c}$  горючих составляющих газа по длине диффузионного факела принимает вид

$$\frac{\bar{c}}{c_0} = 0,821 e^{-14,63 \frac{1}{Pe} \cdot \frac{z}{d}} + 0,0987 e^{-88,7 \frac{1}{Pe} \cdot \frac{z}{d}} + 0,0135 e^{-212,2 \frac{1}{Pe} \cdot \frac{z}{d}} + \dots \quad (23)$$

В этом уравнении  $c_0$  — начальное содержание горючих составляющих газа, выраженное в объемных процентах;  $d$  — диаметр внутренней (газовой) трубки;  $\bar{Pe} = \frac{wd}{K}$  — усредненный критерий Пекле для процесса диффузии.

Для приближенных расчетов Н. С. Махов отбрасывает второй, третий и последующие члены ряда в уравнении (23) и вместо 0,821 коэффициент у первого члена ряда принят равным 1, вследствие чего уравнение (23) принимает вид

$$\frac{\bar{c}}{c_0} = e^{-14,63 \frac{1}{Pe} \cdot \frac{z}{d}}, \quad (24)$$

откуда

$$z = 0,1574 \bar{Pe} d \lg \frac{c_0}{\bar{c}}$$

или

$$z = 0,1574 \frac{wd^2}{K} \lg \frac{c_0}{\bar{c}}, \quad (25)$$

Концентрации горючего  $c_0$  и  $\bar{c}$  можно выразить через концентрацию кислорода.

Если обозначить  $i$ —число объемов кислорода  $O$  теоретически необходимого для полного сжигания одного объема горючих частей газа,  $\alpha$ —коэффициент избытка воздуха и  $V_0$ —теоретически необходимое количество воздуха, то можно написать

$$c_0 = \frac{\alpha V_0 O_0}{i}$$

$$\text{и } \bar{c}_k = \frac{O_k}{i},$$

откуда

$$\frac{c_0}{\bar{c}_k} = \alpha V_0 \frac{O_0}{O_k}. \quad (26)$$

Подставив значение  $\frac{c_0}{\bar{c}_k}$  в уравнение (25) для конечного состояния диффузионного факела ( $\bar{c} = \bar{c}_k$ ), получим:

$$z = 0,1574 \frac{\omega d^2}{K} \lg \left( \alpha V_0 \frac{O_0}{O_k} \right). \quad (27)$$

Если фронт пламени имеет цилиндрическую форму (при  $\alpha = 1$ ), то величина  $d$  имеет постоянное значение по длине факела, равное диаметру газовой трубки. Если фронт пламени имеет расширяющуюся или сужающуюся форму (при  $\alpha \neq 1$ ), то  $d$  приобретает переменное значение по длине факела. В этих случаях (по Н. С. Махову) переменное значение  $d$  определяется как среднее квадратичное из начального  $d$  равного диаметру газовой трубки и конечного  $d_k$

$$d_m^2 = \frac{d^2 + d_k^2 + dd_k}{3}.$$

Величина  $d_k$  может быть найдена из следующих положений: для цилиндрического диффузионного факела при  $\omega_2 = \omega_1$

$$V_0 = \frac{R^2}{\rho^2} - 1,$$

для расширяющегося или сужающегося факела

$$\alpha V_0 = \frac{R^2}{\rho_k^2} - 1;$$

$$\text{отсюда } d_k = 2\rho_k R = 2\rho R \sqrt{\frac{1}{\alpha(R^2 - \rho^2) + \rho^2}}$$

и

$$d_m^2 = \frac{d^2 + 4\rho^2 R^2 \left[ \frac{1}{\alpha(R^2 - \rho^2) + \rho^2} \right] + d 2\rho R \sqrt{\frac{1}{\alpha(R^2 - \rho^2) + \rho^2}}}{3}$$

$$\text{или } d_m^2 = \frac{1}{3} d^2 \left[ 1 + R^2 \left( \frac{1}{\alpha(R^2 - \rho^2) + \rho^2} \right) + R \sqrt{\frac{1}{\alpha(R^2 - \rho^2) + \rho^2}} \right]$$

$$\text{или } d_m^2 = \beta d^2,$$

где

$$\beta = \frac{1}{3} \left[ 1 + R^2 \left( \frac{1}{\alpha(R^2 - \rho^2) + \rho^2} \right) + R \sqrt{\frac{1}{\alpha(R^2 - \rho^2) + \rho^2}} \right] \quad (28)$$

Итак, уравнение (27) для определения длины диффузионного факела принимает вид

$$z = 0,1574 \beta \frac{\bar{w}d^2}{K} \lg \left( \alpha V_0 \frac{O}{O_k} \right). \quad (29)$$

Это уравнение в дальнейшем использовано нами для определения длины трубчатого диффузионного факела. Необходимо иметь в виду, что для определения  $z$  произвольно (или в соответствии с опытными данными) задается конечное содержание непродиффундировавшего кислорода.

### III. Опытное исследование концентрического диффузионного факела

Опытное исследование концентрического диффузионного факела производилось с помощью трехкольцевой цилиндрической горелки. Чертеж горелки представлен на рис. 4.

Для сжигания применялся светильный газ, полученный на газовом заводе института. Состав газа по данным химического анализа:  $CO_2 - 7,4\%$ ,  $O_2 - 5,9\%$ ,  $C_2H_4 - 1,4\%$ ,  $CO - 14,0\%$ ,  $N_2 - 37\%$ ,  $CH_4 - 27,5\%$ ,  $N_2 - 6,8\%$ .

Теплотворная способность газа  $Q_k^P = 3900 \frac{\text{ккал}}{\text{м}^3}$ .

Содержание горючих в газе  $0,799 \frac{\text{м}^3}{\text{м}^3}$ , теоретически необходимое для сжигания количество кислорода  $0,788 \frac{\text{м}^3}{\text{м}^3}$ , теоретически необходимое количество воздуха  $3,76 \frac{\text{м}^3}{\text{м}^3}$ .

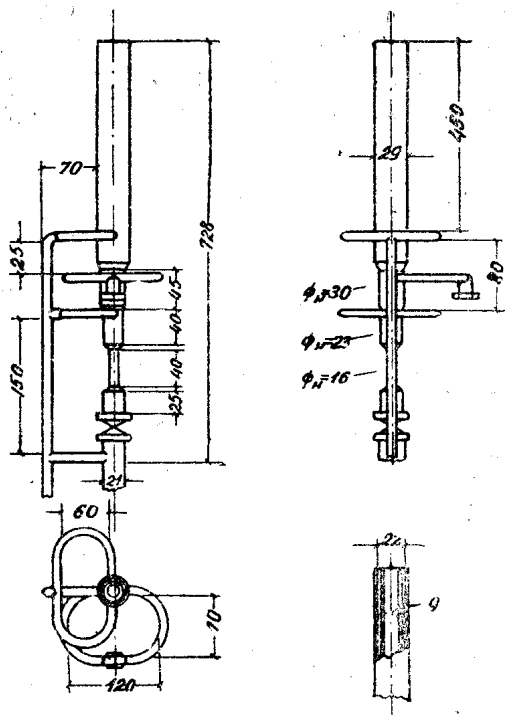


Рис. 4. Трехкольцевая цилиндрическая горелка

Для определения основных размеров горелки (диаметра и длины цилиндрической части) были приняты условия: 1) чтобы коэффициент избытка воздуха равнялся  $\alpha = 1,3$  и 2) чтобы длина цилиндрической части горелки, считая от места ввода газа воздуха, составляла около 20 диаметров. В соответствии с этими условиями было рассчитано:

а) внешний радиус кольцевого пространства для воздуха  $R$  при радиусе внутренней газовой трубки  $\rho = 4,5 \text{ мм}$  по уравнению (17)

$$\alpha V_0 = \frac{R^2}{\rho^2} - 1,$$

$$R = \rho \sqrt{\alpha V_0 + 1} = 4,5 \sqrt{1,3 \cdot 3,76 + 1} = 11 \text{ мм.}$$



Толщина стенки внутренней газовой трубки 0,5 мм.  
 Поперечное сечение внутренней газовой трубки

$$\frac{\pi d^2}{4} = 0,785 (0,009)^2 = 0,64 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2;$$

поперечное сечение воздушного кольца

$$\frac{\pi}{4} [ D^2 - (d + 0,0005)^2 ] = 0,31 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2;$$

б) длина цилиндрической части горелки выше ввода газа и воздуха

$$H = 20 D = 20,22 = 440 \text{ мм.}$$

Светильный газ подавался через внутреннюю трубку диаметром 9 мм; воздух, необходимый для горения, подавался через первое кольцевое пространство диаметром от 10 до 22 мм, затем через второе кольцевое пространство диаметром от 23 до 27 мм также подавался воздух со скоростью такой же, как и в первое кольцевое пространство, для того чтобы изолировать факел пламени от влияния неподвижной внешней среды; третье кольцо в данной серии опытов не использовалось. Во избежание искривления оси факела под влиянием подъёмной силы горелка располагалась вертикально. Расход газа и воздуха измерялся при помощи нормальных диафрагм и дифференциальных манометров. Целью исследования являлось определение длины факела пламени при различных скоростях истечения в пределах ламинарного режима и сопоставление опытных данных с теоретическими расчетами.

Опыты производились при следующих скоростях истечения газа и воздуха: 0,15 м/сек, 0,2 м/сек, 0,25 м/сек и 0,3 м/сек. Измерялся видимый факел пламени. Результаты измерений представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты наблюдений длины диффузионного факела кольцевой горелки

№ п.п.	Наименование величин	Размерность	Опыты			
			1	2	3	4
1	Расход газа . . . . .	$\frac{\text{м}^3}{\text{час}}$	0,0345	0,0460	0,0576	0,0690
2	Расход воздуха . . . . .	$\frac{\text{м}^3}{\text{час}}$	0,1695	0,2260	0,2826	0,3390
3	Скорость истечения газа и воздуха . . . . .	$\frac{\text{м}}{\text{сек}}$	0,15	0,20	0,25	0,30
4	Коэффициент избытка воздуха . . . . .	—	1,3	1,3	1,3	1,3
5	Число Рейнольдса . . . . .	$\frac{\text{газ}}{\text{воздух}}$	$\frac{67,8}{120}$	$\frac{90}{161}$	$\frac{113}{201}$	$\frac{135}{241}$
6	Длина диффузионного факела по наблюдениям . . . . .	см	10,5	12,4	15,2	16,8

## Расчет длины факела по уравнениям диффузии

(метод Бурке и Шумана)

1. Характеристический параметр решения дифференциального уравнения.

По уравнению (21)

$$E = \frac{\rho}{2} \left[ \frac{V_0(\alpha - 1)}{V_0 + 1} \right];$$

здесь

$$\rho = 0,45 \text{ см},$$

$$V_0 = 3,76 \text{ м}^3/\text{м}^3,$$

$$\alpha = 1,3,$$

$$E = \frac{0,45}{2} \left[ \frac{3,76(1,3 - 1)}{3,76 + 1} \right] = +0,053.$$

По уравнению

$$E = \frac{R^2 c_2}{2 \rho i c_0} - \frac{\rho}{2};$$

здесь

$$R = 1,1 \text{ см},$$

$$\rho = 0,45 \text{ см},$$

$$c_2 = 0,21,$$

$$c_0 = c_1 + \frac{c_2}{i}.$$

$c_1$  (концентрация горючих в газе) = 0,799,

$i$  — число объемов кислорода на 1 объем горючих в газе рассчитывается следующим образом: составные горючие газы пересчитываются на горючую массу, т. е. например  $(\text{H}_2)^2 = \frac{\text{H}_2}{1 - B}$ , где  $B$  — балласт в газе.

Таким образом, состав горючей массы следующий:  $(\text{H}_2)^2 = \frac{37}{1 - 0,201} = 46,4\%$ ,  $(\text{CO})^2 = 17,5\%$ ,  $(\text{CH}_4)^2 = 34,5\%$  и  $(\text{C}_2\text{H}_4)^2 = 1,6\%$ .

Затем по стехиометрическим уравнениям горения определяется количество кислорода потребного для сжигания  $\Gamma$  объема горючей массы за вычетом имеющегося в газе кислорода; в нашем случае

$$i = 1,057 - 0,059 = 0,998,$$

$$c_0 = c_1 + \frac{c_2}{i} = 0,799 + \frac{0,21}{0,998} = 1,01,$$

тогда

$$E = \frac{(1,1)^2 \cdot 0,21}{2 \cdot 0,45 \cdot 0,998 \cdot 1,01} - \frac{0,45}{2} = +0,055.$$

Положительное значение  $E$  показывает, что форма диффузионного факела должна быть конически сужающейся.

## 2. Расчет числа $Re$

$$Re = \frac{\omega d \rho}{\mu} = \frac{\omega d \gamma}{g \mu}$$

Для газа:  $\omega = (0,15 - 0,20 - 0,25 - 0,30) \text{ м/сек}$ ;  $\rho$  по правилу аддитивности для смеси  $= 0,0753 \frac{\text{кг/сек}^2}{\text{м}^4}$ ,  $\mu$  по правилу аддитивности для смеси  $= 0,01396 \text{ сантипуаз}$ ,

$$\gamma = 0,7 \text{ кг/м}^3,$$

$$d = 0,009 \text{ м.}$$

Для воздуха:  $\omega \left( \frac{\text{м}}{\text{сек}} \right)$  — те же значения, что и для газа;

$$\rho = 0,132 \text{ кг сек}^2/\text{м}^4;$$

$$\mu = 0,0183 \text{ сантипуаз};$$

$$\gamma = 1,226 \text{ кг/м}^3;$$

$$d_{np} = 4 \frac{F}{\Pi^*} = 4 \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) \frac{1}{2\pi(R+r)} = 0,013 \text{ м.}$$

## 3. Коэффициент диффузии.

Расчет сделан по обратной формуле смешения

$$\frac{1}{k} = \left( \frac{n_1}{k_1} + \frac{n_2}{k_2} + \dots \right) \cdot 0,01,$$

где  $n_1, n_2 \dots$  — объемное содержание составных частей газа в %,   
 $k_1, k_2 \dots$  — коэффициенты диффузии составляющих газов по системе газ-воздух.

Из справочника технической энциклопедии том VII, стр. 247 для  $\text{H}_2$  — воздух —  $0,611 \text{ см}^2/\text{сек}$ ;

$\text{CO}$  — кислород —  $0,185$  „ „ принимаем и для системы  $\text{CO}$  — воздух;

$\text{C}_2\text{H}_4$  — воздух —  $0,101 \text{ см}^2/\text{сек}$ .

$\text{O}_2$  — воздух —  $0,178$  „ „

$\text{N}_2$  — воздух —  $0,171$  „ „

$\text{CO}_2$  — воздух —  $0,139$  „ „

$\text{CH}_4$  — воздух —  $0,476$  по [17].

Следовательно,

$$\frac{1}{k} = \left( \frac{37}{0,611} + \frac{14}{0,185} + \frac{1,4}{0,101} + \frac{5,9}{0,178} + \frac{6,8}{0,171} + \frac{7,4}{0,139} + \frac{27,5}{0,476} \right) \cdot 0,01 = 3,3,$$

$$k = 0,3 \frac{\text{см}^2}{\text{сек}}.$$

4. Определение корней уравнения  $I_1(x) = 0 = I_1(\mu R)$  и функций Бесселя первого рода нулевого и первого порядка.

Из XXIV таблицы специальных функций [16]

для корня № 1 значение его 3,8317 и  $I_0(x_1) = -0,4028$ ,

№ 2 „ „ 7,0156 и  $I_0(x_2) = +0,3001$ ,

№ 3 „ „ 10,1735 и  $I_0(x_3) = -0,2497$ .

Так как  $x = \mu R_1$ , то для  $R = 1,1$  см получим  $\mu_1 = 3,48$ ;  $\mu_2 = 6,37$  и  $\mu_3 = 9,25$ ; для  $\rho = 0,45$  см;  $\mu_1 \rho = 1,57$ ;  $\mu_2 \rho = 2,88$ ;  $\mu_3 \rho = 4,15$ .

Из табл. 1 специальных функций [16] величины  $I_1(\mu \rho) = +0,56674$ ,  $I_1(\mu_2 \rho) = +0,38246$ ,  $I_1(\mu_3 \rho) = -0,12121$ . Так как форма факела является суживающейся, то следует принять в уравнение (19)  $r = 0$  и тогда  $I_0(\mu r) = 1$ , т. е. расчет длины сужающегося факела следует выполнить по уравнению

$$E = \frac{R^2 c_2}{2 \rho i c_0} - \frac{\rho}{2} = \sum_{n=1}^{n \sim} \frac{1}{\mu_n} \cdot \frac{I_1(\mu_n \rho)}{I_0^2(\mu_n R)} \cdot e^{-\frac{k \mu_n^2 z}{w}} \quad (30)$$

Уместно отметить, что при решении этого уравнения можно ограничиться подстановкой значений лишь первых трех корней вследствие резкого возрастания отрицательного показателя степени.

5. Длина диффузионного факела в зависимости от скорости потока газа

для  $w_1 = 15 \frac{\text{см}}{\text{сек}}$ ,

$$0,055 = \frac{1}{3,48} \cdot \frac{0,56674}{(-0,4028)^2} \cdot e^{-0,3 \frac{(3,48)^2}{15} z_1} + \frac{1}{6,37} \cdot \frac{0,38246}{(0,3)^2} \cdot e^{-0,3 \frac{(6,37)^2}{15} z_1} + \\ + \frac{1}{9,25} \cdot \frac{-0,12121}{(-0,2497)^2} \cdot e^{-0,3 \frac{(9,25)^2}{15} z_1}$$

или  $0,055 = 0,998 e^{-0,224 z_1} + 0,67 e^{-0,815 z_1} + 0,207 e^{-1,7 z_1}$ .

Отсюда  $z_1 = 11,8$  см,

для  $w_2 = 20$  см/сек,

$z_2 = 15,6$  см,

для  $w_3 = 25$  см/сек,

$z_3 = 19,6$  см,

для  $w_4 = 30$  см/сек,

$z_4 = 23,6$  см.

При расчете диффузионного концентрического факела по методу Н. С. Махова необходимо предварительно задать содержание кислорода в конце диффузионного факела, отнеся его к первоначально взятому воздуху. При горении с избытком воздуха следует считать, что остается по крайней мере такое количество кислорода, не вступившего в соединение с горючими газами, которое соответствует коэффициенту избытка воздуха. Тогда для расчета длины диффузионного факела величины, входящие в уравнение (29), будут следующие:

$w = 15$  см/сек —  $20$  см/сек —  $25$  см/сек и  $30$  см/сек,

$d = 0,9$  см,

$$k = 0,3 \text{ см}^2/\text{сек},$$

$$\alpha = 1,3,$$

$$V_0 = 3,76 \text{ м}^3/\text{м}^3,$$

$$O_0 = 21\%,$$

$$O_k = 4,89\%,$$

$$R = 1,1 \text{ см},$$

$$\rho = 0,45 \text{ см}.$$

Подставив эти величины в уравнение (29), получим для скорости  $w_1 = 15 \text{ см/сек}$  длину диффузионного факела

$$z_1 = 0,1574 \cdot 0,9 \frac{15(0,9)^2}{0,3} \lg \left( 1,3 \cdot 3,76 \frac{21}{4,89} \right),$$

$$z_1 = 8,45 \text{ см},$$

для скорости  $w_2 = 20 \text{ см/сек}$   $z_2 = 11,3 \text{ см},$

для скорости  $w_3 = 25 \text{ см/сек}$   $z_3 = 14,1 \text{ см},$

для скорости  $w_4 = 30 \text{ см/сек}$   $z_4 = 16,9 \text{ см}.$

Для большей наглядности в табл. 2 приведены сравнительные данные по результатам наблюдений и расчетов длины диффузионного факела.

Таблица 2

Сравнительные данные о длине концентрического диффузионного факела

№ п.п.	Наименование величин	Скорость истечения газа и воздуха			
		15 см/сек	20 см/сек	25 см/сек	30 см/сек
1	Длина факела по наблюдению $z_n$ .	10,5	12,4	15,2	16,8
2	Длина факела по расчету методом Бурке и Шумана $z_{БШ}$ .	11,8	15,6	19,6	23,5
3	Отношение $\frac{z_n}{z_{БШ}}$ . . . . .	0,89	0,89	0,77	0,72
4	Длина факела по расчету методом Махова $z_M$ . . . . .	8,45	11,3	14,1	16,9
5	Отношение $\frac{z_n}{z_M}$ . . . . .	1,24	1,10	1,08	0,995

По мере увеличения скорости истечения увеличивается расхождение между наблюдаемой и рассчитанной по методу Бурке и Шумана длиной диффузионного факела, причем наблюдаемая длина всегда меньше рассчитанной, и наоборот, по мере увеличения скорости истечения уменьшается расхождение между наблюдаемой и рассчитанной по методу Н. С. Махова длинами диффузионного факела. Расхождение рассчитанных по методу Н. С. Махова и наблюдаемых длин диффузионного факела значительно меньше, чем рассчитанных по методу Бурке и Шумана. Следует также отметить, что для практического пользования расчетные уравнения по методу Н. С. Махова являются значительно более простыми, и в этом заключается преимущество метода.

## IV. Опытное исследование плоско-параллельного диффузионного факела

### А. Длина диффузионного факела по наблюдениям

Опытное исследование плоско-параллельного диффузионного факела производилось двумя способами: во-первых, при истечении газового и воздушного потоков в атмосферу и, во вторых, при истечении газового и воздушного потоков в экранированную топочную камеру.

Для исследования диффузионного факела в атмосферных условиях были изготовлены три горелки: трех- и семищелевая газовые горелки ЗЩГ,

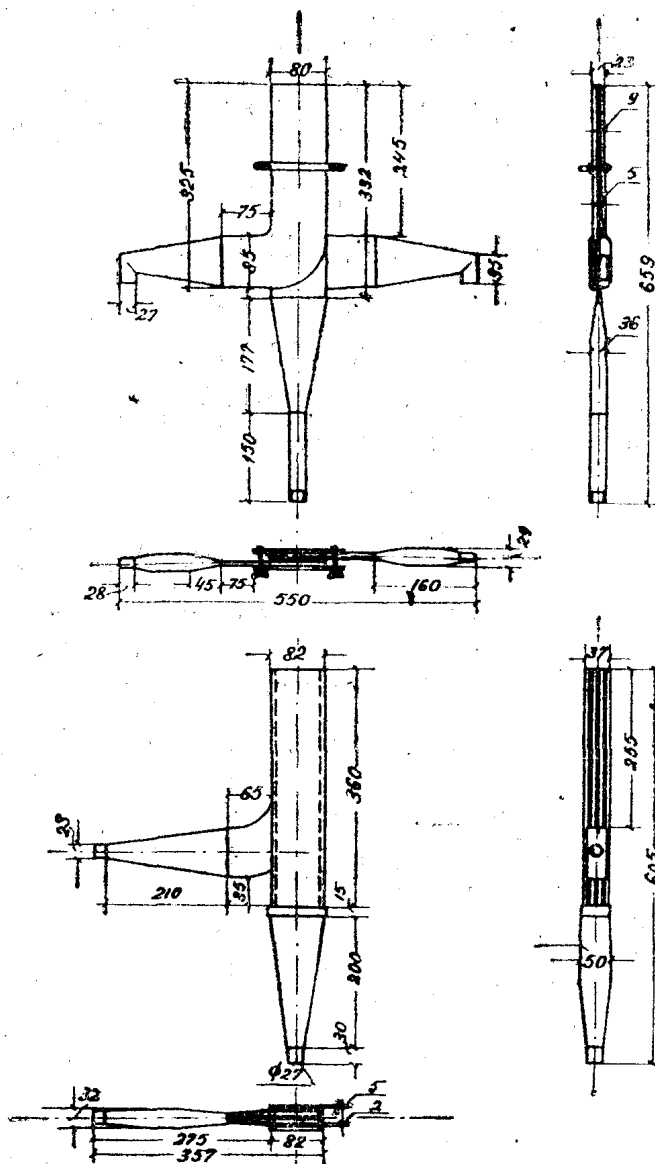


Рис. 5. Чертежи испытанных горелок

7ЩГ—для сжигания светильного газа и трехщелевая малых размеров для сжигания водяного газа. Чертежи горелок изображены на рис. 5.

Для сжигания применялся светильный газ того же состава, что и при исследовании концентрического диффузионного факела, и водяной газ состава:  $\text{CO}_2$ —4,8%,  $\text{O}_2$ —0,4%,  $\text{CO}$ —29%,  $\text{H}_2$ —52,2%,  $\text{CH}_4$ —6,2%,  $\text{N}_2$ —7,3%. Размеры трехщелевой горелки для сжигания светильного газа следую-

щие: ширина внутренней газовой щели 2 мм, ширина каждой наружной щели 5 мм; общая ширина потока воздуха и газа  $5+2+5=12$  мм. Длина щелей 60 мм. Поперечное сечение газовой щели  $0,002 \cdot 0,06 = 0,00012$  м<sup>2</sup>, поперечное сечение воздушных щелей  $2 \cdot 0,005 \cdot 0,06 = 0,0006$  м<sup>2</sup>.

При равенстве скоростей истечения газа и воздуха соотношение между количеством их (коэффициент избытка воздуха) определится из уравнения (11)

$$\frac{s-a}{a} = \alpha V_0,$$

$$2s = 12 \text{ мм},$$

$$2a = 2 \text{ мм}, \quad \alpha = \frac{2s-2a}{2a V_0} = \frac{12-2}{2 \cdot 3,76} = 1,33.$$

$$V_0 = 3,76 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Горелка разъемная собирается из отдельных трех элементов, образующих щели. Это сделано с той целью, чтобы в дальнейшем можно было исследовать влияние наклона воздушных потоков к газовому на длину диффузионного факела. Металлические стенки, образующие щели, перед выходом газа и воздуха были сточены до 0,1 мм.

Семищелевая горелка для сжигания светильного газа имела размеры: внутренняя газовая щель шириной 2 мм, затем 2 щели, облегающие внутреннюю, размерами по толщине 10 мм каждая, затем 2 щели газовые шириной по 2,2 мм каждая и наконец 2 наружные воздушные щели шириной по 5 мм каждая. Общая ширина воздушно-газового потока  $5+2,0+10+2,0+10+5=34$  мм. Длина щелей 60 мм. Поперечное сечение газовой щели  $3 \cdot 0,002 \cdot 0,06 = 0,00036$  м<sup>2</sup>, поперечное сечение воздушных щелей

$$2 \cdot 0,01 \cdot 0,06 + 2 \cdot 0,005 \cdot 0,06 = 0,0018 \text{ м}^2.$$

При равенстве скоростей истечения газа и воздуха соотношение между количествами их определится из уравнения

$$\alpha V_0 = \frac{F_{в.щ.}}{F_{г.щ.}},$$

$$F_{в.щ.} = 0,0018 \text{ м}^2,$$

$$F_{г.щ.} = 0,00036 \text{ м}^2, \quad \alpha = \frac{0,0018}{3,76 \cdot 0,00036} = 1,33.$$

$$V_0 = 3,76 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Такое же соотношение будет между воздухом и газом, если рассматривать не всю горелку, а ее отдельные элементы. Семищелевая горелка также разъемная. Исследования этой горелки были выполнены с той целью, чтобы проследить влияние соседних облегающих факелов на центральный факел. При исследовании факела, при истечении в атмосферу горелки располагались вертикально, во избежание искривления оси факела под влиянием подъемной силы. Расход газа и воздуха измерялся при помощи нормальных диафрагм и дифференциальных манометров. Опыты производились при скоростях истечения газа и воздуха 0,9 м/сек—1,5 м/сек—2 м/сек. Измерялся видимый факел пламени. Результаты измерений представлены в табл. 3, фотоснимок опытной установки на рис. 6.

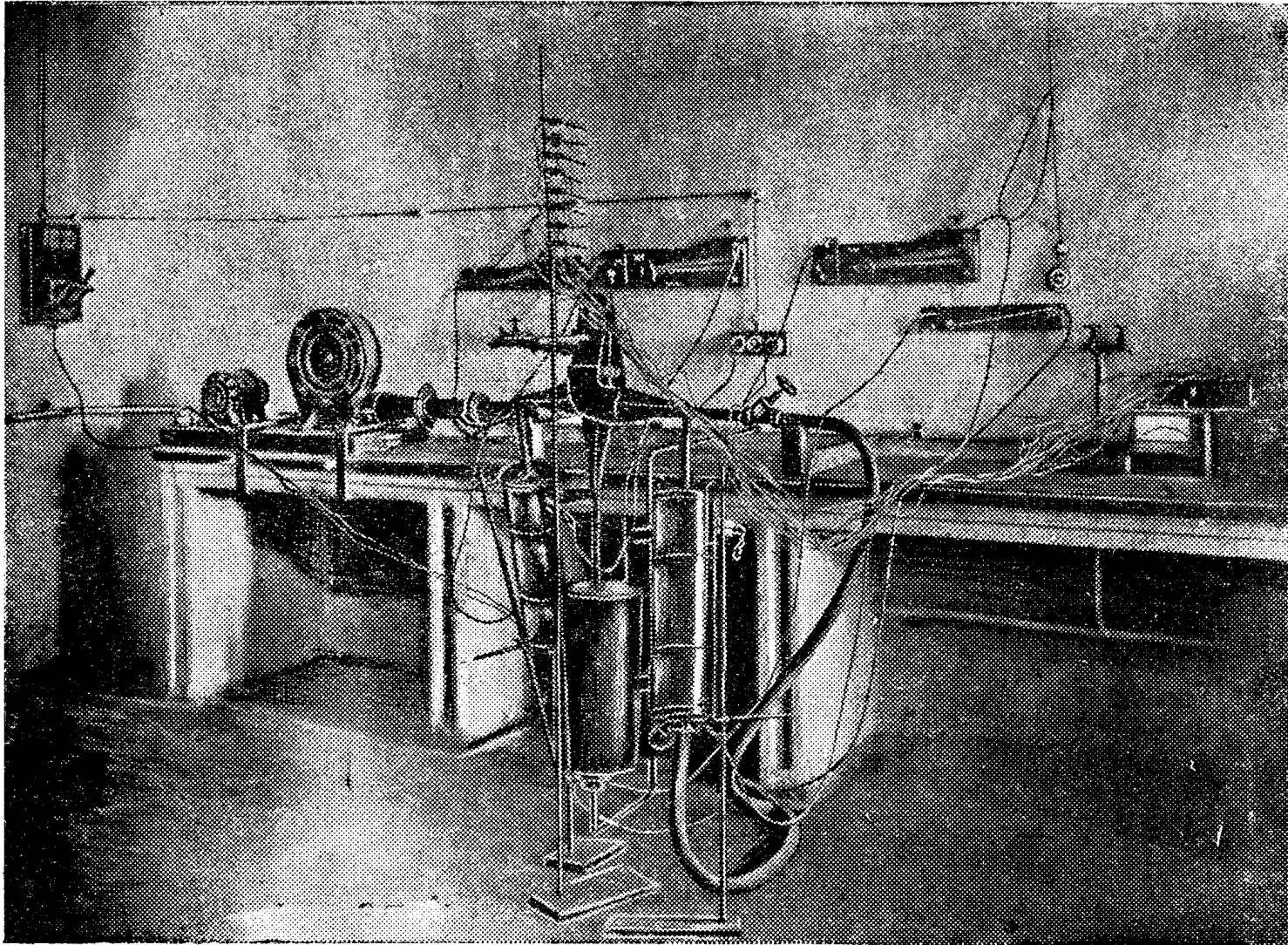


Рис. 6  
Фотоснимок опытной установки диффузионного горения



Таблица 3

Результаты наблюдений длины плоского диффузионного факела светильного газа

№ п. п.	Наименование величин	Размерность	Опыты					
			Трехщелевая горелка			Семищелевая горелка		
			Скорость истечения газа и воздуха			Скорость истечения газа и воздуха		
			90 $\frac{см}{сек}$	150 $\frac{см}{сек}$	200 $\frac{см}{сек}$	90 $\frac{см}{сек}$	150 $\frac{см}{сек}$	200 $\frac{см}{сек}$
1	Расход газа . . . . .	$м^3$ час	0,389	0,650	0,865	1,17	1,94	2,59
2	Расход воздуха . . . . .	$м^3$ час	1,92	3,25	4,32	5,83	9,73	12,96
3	Коэффициент избытка воздуха . . . . .	—	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33
4	Число Рейнольдса	газ возд.	174	290	388	174	290	388
			555	925	1230	1025	1710	2280
5	Приведенный диаметр	газ возд.	0,00387	0,00387	0,00387	0,00387	0,00387	0,00387
			0,0092	0,0092	0,0092	0,0092 и 0,017	0,0082 и 0,017	0,0092 и 0,017
6	Длина диффузионного факела по наблюдениям	см	17,5	31	44	19	33	46

Примечание:  $d_{пр.} = 0,0092$  для наружных воздушных щелей размерами  $5 \times 60$ ,  
 $d_{пр.} = 0,017$  для внутренних воздушных щелей размерами  $10 \times 60$ .

Трехщелевая горелка для сжигания водяного газа имела следующие размеры: внутренняя газовая щель шириной 1 мм, ширина каждой наружной щели 1,1 мм; общая ширина потоков газа и воздуха  $1,1 + 1 + 1,1 = 3,2$  мм. Длина щелей 19,5 мм. Поперечное сечение газовой щели  $0,0000195 м^2$ ; поперечное сечение воздушных щелей  $0,0000429 м^2$ . При равенстве скоростей истечения газа и воздуха соотношение между количествами их (коэффициент избытка воздуха) определяется из уравнения (11)

$$\frac{s-a}{a} = \alpha V_0,$$

$$2s = 3,2 \text{ мм},$$

$$2a = 1 \text{ мм} \quad \alpha = 0,88$$

$$V_0 = 2,5 \text{ м}^3/\text{м}^2.$$

Расход газа и воздуха измерялся при помощи газометров емкостью по 15 литров каждый; истечение газа и воздуха из газометров происходило при постоянном напоре воды: при повышении уровня воды в нижней части газометра на такую же высоту поднимался уровень воды в верхней части газометра. Приток воды регулировался с помощью поплавка, помещенного в верхнюю часть газометра, поплавок снабжен стрелками-указателями уровней воды в нижней и верхней частях газометра. Расстояние между уровнями воды вверху и внизу поддерживалось постоянным, равным 1015 мм. В зависимости от скорости истечения экспозиция наблюдений длилась от 40 до 350 секунд. Равномерность истечения за все время экспозиции обеспечивалась предварительной настройкой вентилей на воз-

духо-газопроводе по специальной шкале. Результаты измерений представлены в табл. 4. Объемы газа и воздуха в таблице приведены к атмосферному давлению в условиях изотермического расширения.

Таблица 4

Результаты наблюдений длины плоского диффузионного факела водяного газа

№ п. п.	Наименование величин	Размерность	Опыты						
			1	2	3	4	5	6	7
1	Время экспозиции . . . . .	сек	337,5	151,5	188,5	53	55	64	62
2	Расход газа . . . . .	литр	5,92	5,42	6,52	5,7	5,51	5,14	5,02
3	Расход воздуха . . . . .	„	13,62	12,16	14,90	13,4	12,97	13,5	12,04
4	Коэффициент избытка воздуха	—	0,91	0,89	0,91	0,93	0,93	0,93	0,952
5	Скорость истечения } $\left. \begin{array}{l} \text{газа} \\ \text{возд.} \end{array} \right\}$	м	0,9	1,83	1,77	5,5	5,15	4,11	4,15
		сек	0,94	0,87	1,84	5,9	5,5	4,38	4,52
6	Число Рейнольдса } $\left. \begin{array}{l} \text{газ} \\ \text{возд.} \end{array} \right\}$		70,6	144	139	432	405	323	326
			138	275	271	868	735	645	666
7	Длина наблюденного факела.	мм	21	42	41	120	110	99	101

### Б. Расчет длины факела по уравнениям диффузии

Для факела светильного газа

Характеристический параметр решения дифференциального уравнения диффузии для горения светильного газа.

По уравнению (14)

$$E = \frac{\pi}{2} \left( \frac{c_2}{ic_0} - \frac{a}{s} \right).$$

Здесь  $c_2 = 0,21$ ,  $i = 0,998$ ,  $c_1 = 0,799$ . По предыдущему для светильного газа ранее указанного состава

$$c_0 = c_1 + \frac{c_2}{i} = 0,799 + \frac{0,21}{0,998} = 1,01,$$

$$a = 0,1 \text{ см,}$$

$$s = 0,6 \text{ см,}$$

$$E = \frac{3,14}{2} \left( \frac{0,21}{0,998 \cdot 1,01} - \frac{0,1}{0,6} \right) = 0,065.$$

Положительное значение  $E$  показывает, что форма диффузионного факела—сходящаяся при  $x = 0$ . Длина диффузионного факела в зависимости от скорости потока:

для  $w_1 = 90 \text{ см/сек.}$

По уравнению (14)

$$E = \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{1}{n} \sin \frac{n\pi a}{s} \cos \frac{n\pi x}{s} e^{-\frac{kn^2\pi^2}{ws^2} z}$$

Расчет ведется относительно  $z$  при  $x=0$ , т. е. рассчитывается максимальная длина сходящегося факела. Ввиду быстрой сходимости ряда можно ограничиться первыми тремя членами ряда. Тогда

$$0,065 = \frac{1}{1} \cdot \sin \frac{1.3, 14.0, 1}{0,6} \cdot 1 \cdot e^{-\frac{0,3 \cdot 1^2 (3,14)^2}{90 \cdot (0,6)^2} z_1} +$$

$$+ \frac{1}{2} \cdot \sin \frac{2.3, 14.0, 1}{0,6} \cdot 1 \cdot e^{-\frac{0,3 \cdot 2^2 (3,14)^2}{90 \cdot (0,6)^2} z_1} +$$

$$+ \frac{1}{3} \cdot \sin \frac{3.3, 14.0, 1}{0,6} \cdot 1 \cdot e^{-\frac{0,3 \cdot 3^2 (3,14)^2}{90 \cdot (0,6)^2} z_1},$$

$$z_1 = 21,9 \text{ см.}$$

Для  $w_2 = 150 \text{ см/сек}$   $z_2 = 36,5$ ,

для  $w_3 = 200 \text{ см/сек}$   $z_3 = 48,7$ .

Сравним наблюдаемые высоты с рассчитанными. Для трехщелевой горелки при скорости  $w_1 = 0,9 \text{ м/сек}$  отношение

$$\varphi_1 = \frac{z \text{ наблюдаемое}}{z \text{ рассчитанное}} = \frac{17,5}{21,9} = 0,8; \text{ при скорости } w_2 = 1,5 \text{ м/сек,}$$

$$\varphi_2 = \frac{31}{36,5} = 0,85$$

$$\text{и при скорости } w_3 = 2,0 \text{ м/сек, } \varphi_3 = \frac{44}{48,7} = 0,90.$$

Для семищелевой горелки при скорости  $w_1 = 0,9 \text{ м/сек}$  отношение

$$\varphi_1 = \frac{19}{21,9} = 0,87, \text{ при скорости } w_2 = 1,5 \text{ м/сек } \varphi_2 = \frac{33}{36,5} = 0,9$$

$$\text{и при скорости } w_3 = 2,0 \text{ м/сек } \varphi_3 = \frac{46}{42,7} = 0,95.$$

Указанные результаты дают основание утверждать, что семищелевая горелка дает более длинный факел, чем трехщелевая при одинаковых скоростях истечения и одинаковой ширине щелей и что это удлинение факела происходит, по видимому, не вследствие увеличения производительности горелки, а вследствие влияния соседних облегающих подвижных слоев.

Воспользуемся уравнениями П. Г. Иванцова, выведенными для процесса диффузии (9) для суждения о степени завершенности диффузии по наблюдаемым длинам диффузионного факела. Для большей наглядности и сопоставления данные, рассчитанные по методу П. Г. Иванцова, по методу Бурке и Шумана и наблюдаемые в опытах, представлены в табл. 5.

Для факела водяного газа

По методу, изложенному выше, рассчитана длина диффузионного факела водяного газа.

Характеристический параметр решения дифференциального уравнения диффузии по уравнению (14)

$$E = \frac{\pi}{2} \left( \frac{c_2}{ic_0} - \frac{a}{s} \right).$$

Таблица 5

Степень завершенности диффузии во фронте пламени, рассчитанная по уравнению Иванцова (9) в соответствии с рассчитанными по Бурке и Шуману и наблюдаемыми длинами диффузионного факела. Горелка—плоская, трехщелевая; светильный газ.

№ п.п.	Наименование величин	Обозначение и размерность	Скорость истечения газа и воздуха		
			90 см/сек	150 см/сек	200 см/сек
1	Длина диффузионного факела, рассчитанная по методу Бурке и Шумана . . . . .	см	21,9	36,5	48,7
2	Длина диффузионного факела по экспериментальным данным автора . . . . .	см	17,5	31,0	44,0
3	Концентрация диффундирующего газа во фронте пламени по уравн. Иванцова при . . . . . $\alpha = 1,33$ $V_0 = 3,76$ $a = 0,1$ см $s = 0,6$ см	$(PA)_{x=0}$	0,359	0,305	0,271
4	Степень завершенности диффузии		0,78	0,84	0,88

$$c_2 = 0,21,$$

$$i = 0,61,$$

$$c_1 = 0,874, \quad E = \frac{3,14}{2} \left( \frac{0,21}{0,61 \cdot 1,218} - \frac{0,05}{0,16} \right) = -0,0471$$

$$c_0 = 1,218,$$

$$a = 0,05 \text{ см},$$

$$s = 0,16 \text{ см}.$$

Отрицательное значение для  $E$  показывает, что форма факела расходящаяся и в уравнении (14) следует принять  $x = s$ .

Коэффициент диффузии, вычисленный по обратной формуле смешения, равен  $K = 0,3 \text{ см}^2/\text{сек}$ . Результаты расчета длины диффузионного факела водяного газа для разных скоростей истечения приведены в табл. 6.

Таблица 6

Расчетная длина диффузионного факела водяного газа

№ п.п.	Наименование величин	Размерность	Опыты						
			1	2	3	4	5	6	7
1	Скорость истечения } газа } возд.	м	0,9	1,83	1,77	5,5	5,15	4,11	4,15
		сек	0,94	1,87	1,84	5,9	5,5	4,38	4,52
2	Расчетанная длина диффузионного факела . . . . .	мм	23,3	47,5	45,8	142	133	106	107
3	Отношение: } наблюден. } длина } рассчитан. } длина	—	0,9	0,89	0,9	0,85	0,83	0,93	0,95

## В. Исследование влияния предварительного подогрева газа и воздуха на длину диффузионного факела

Предварительный подогрев газа и воздуха влияет на развитие диффузионного процесса вследствие того что: а) объем газов увеличивается по закону бинорма расширения  $v_t = v_0 (1 + \beta t)$  и при том же сечении выхода увеличивается также и скорость истечения  $w_t = w_0 \left( \frac{T}{T_0} \right)$  и

б) увеличивается коэффициент диффузии приблизительно по закону  $K_t = K \left( \frac{T}{T_0} \right)^{1,75}$ . Согласно уравнениям диффузии (9,14) длина диффу-

зионного факела определяется из безразмерного комплекса  $\frac{Kz}{\omega S^2}$  и из-

меняется пропорционально скорости истечения и обратно пропорционально коэффициенту диффузии, поэтому совместное влияние обоих факторов будет определяться уравнением

$$z = f \left( \frac{\omega_0 T}{T} \cdot \frac{T_0^{1,75}}{K T^{1,75}} \right) = f \left[ \frac{\omega_0}{K} \left( \frac{T_0}{T} \right)^{0,75} \right]. \quad (31)$$

Из этого уравнения следует, что с увеличением температуры диффундирующих газов длина диффузионного факела уменьшается в отношении  $\left( \frac{T_0}{T} \right)^{0,75}$ .

Исследование влияния предварительного подогрева газа и воздуха на длину диффузионного факела производилось с помощью плоской трехщелевой горелки, описанной выше. Трубопроводы, подводящие газ и воздух к горелке, помещались в две трубчатые электропечи. Температура подогрева газа и воздуха, измеряемая при выходе их из горелки, была 220—260°C. Результаты измерений и расчета по уравнению (14) длины диффузионного факела представлены в табл. 7.

Таблица 7

Результаты наблюдения и расчета длины диффузионного факела плоской трехщелевой горелки при подогреве газа и воздуха до 220°C

1. Расход газа  $\frac{\text{нм}^3}{\text{час}} = 0,865$
2. Расход воздуха  $\frac{\text{нм}^3}{\text{час}} = 4,32$
3. Коэффициент избытка воздуха 1,33
4. Скорость истечения при  $NT$   $\left. \begin{array}{l} \text{газа} \\ \text{воздуха} \end{array} \right\} = \frac{2,00}{2,00} \frac{\text{м}}{\text{сек}}$
5. Скорость истечения при 220°C  $\left\{ \begin{array}{l} \text{газ} \\ \text{воздух} \end{array} \right. = \frac{3,62}{3,62}$
6. Коэффициенты диффузии  $\left\{ \begin{array}{l} K = 0,3 \text{ см}^2/\text{сек.} \\ K_{220^\circ} = 0,861 \text{ см}^2/\text{сек.} \end{array} \right.$
7. Отношение  $\left( \frac{T_0}{T} \right)^{0,75} \cdot \frac{\omega_0}{K} = 0,644 \cdot 668 = 430$
8. Длина диффузионного факела  $\frac{\text{наблюденная}}{\text{рассчитанная}} = \frac{30 \text{ см}}{32 \text{ см}} = 0,93$

Сравним результаты наблюдаемой и рассчитанной длины диффузионного факела при истечении „холодных“ газа и воздуха и предварительно подогретых до 220°C. Из табл. 3 видно, что при скорости 200 см/сек наблюдаемая длина факела составляет 44 см, в данном случае—30 см; относительное уменьшение длины  $\frac{44 - 30}{44} = 0,32$ . При истечении „холодных“

газа и воздуха рассчитанная длина факела при той же скорости 48 см, при истечении подогретых—32 см; относительное уменьшение длины  $\frac{48,7 - 32}{48,7} = 0,345$ . Из сопоставления величин, характеризующих рассчитан-

ное и действительное относительное уменьшение длины диффузионного факела, можно сделать вывод, что, повидимому, увеличение коэффициента диффузии с повышением температуры происходит не пропорционально  $\left(\frac{T}{T_0}\right)^{1,75}$ , а в большей степени. Кстати отметить, что показатель степени обычно дается в справочниках в пределах от 1,5 до 2,0.

### Г. Исследование влияния неодинаковых скоростей истечения газа и воздуха на длину диффузионного факела

Основным условием чисто диффузионного процесса является наличие только молекулярного переноса вещества, что возможно лишь при диффузии неподвижных газов или находящихся в состоянии ламинарного движения при одинаковых скоростях потока газа и воздуха. Основное уравнение диффузии выведено как раз для указанных условий. Представляет интерес выяснить, как влияет неравенство скоростей истечения на процесс диффузии. Опыты показывают, что если существует неравенство скоростей диффундирующих параллельных потоков, то процесс диффузии параллельных потоков и длина диффузионного факела изменяются: если скорость газа больше скорости воздуха, то длина диффузионного факела увеличивается, если скорость воздуха больше скорости газа, то длина диффузионного факела уменьшается.

В табл. 8 представлены результаты исследования влияния неодинаковых скоростей истечения газа и воздуха на длину факела при параллельном истечении газа и воздуха из трехщелевой плоской горелки.

Таблица 8

Результаты наблюдений длины диффузионного факела плоской трехщелевой горелки при неодинаковых скоростях истечения газа и воздуха

№ п.п.	Наименование величин	Размерность	Скорость истечения см/сек						Примечание
			170 200	200 200	225 200	240 200	260 200	300 200	
1	Расход газа . . . .	$\frac{м^3}{час}$	0,865	0,865	0,865	0,865	0,865	0,865	Чисто диффузионное горение при скорости воздуха и газа равной 200 см/сек.
2	Расход воздуха . .	$\frac{м^3}{час}$	3,66	4,32	4,86	5,17	5,61	6,48	
3	Коэффициент избытка воздуха . . . .	—	1,12	1,33	1,50	1,59	1,72	1,99	
4	Длина диффузионного факела . .	см	48,0	44,0	43,0	42,0	41,0	40,0	

Сделаем попытку рассчитать длину диффузионного факела при неодинаковых скоростях истечения газа и воздуха, но в пределах ламинарного режима. Примем следующие положения: когда факел является чисто диффузионным, т. е. когда  $\frac{\omega^r}{\omega^s} = 1$ , то форма факела определяется знаком для  $E = \frac{\pi}{2} \left( \frac{c_2}{ic_0} - \frac{a}{s} \right) \geq 0$ , величина  $\frac{a}{s}$  определяется в свою очередь из уравнения  $\alpha V_0 = \frac{s-a}{a}$ ; при постоянном значении  $a$  и  $s$  изменение скорости воздушного и газового потоков будет влиять на  $\alpha$ : при увеличении  $\frac{\omega^r}{\omega^s}$  будет уменьшаться  $\alpha$ , и наоборот, при уменьшении  $\frac{\omega^r}{\omega^s}$  будет увеличиваться  $\alpha$ , что видно из следующих соотношений:

$$\alpha V_0 = \frac{F^s}{F^r}; \quad \text{но} \quad \alpha' V_0 = \frac{\omega^s F^s}{\omega^r F^r},$$

Отсюда

$$\frac{\alpha'}{\alpha} = \frac{\omega^s}{\omega^r} \quad \text{или} \quad \alpha' = \alpha \frac{\omega^s}{\omega^r};$$

$$\text{при } \omega^s = \omega^r \quad \alpha' = \alpha.$$

Введем понятие об эквивалентной толщине слоя  $s'$ , т. е. такой предполагаемой толщине слоя, при которой расход воздуха изменяется (вследствие изменения скорости истечения его), но при этом обеспечивается равенство  $\omega^r = \omega^s$ .

Значение эквивалентной толщины слоя  $s'$  можно определить из соотношения, получаемого на основании следующих рассуждений: вследствие того, что толщина газового слоя  $a$  остается неизменной, так же как и скорость истечения газа  $\omega^r$ , но изменяется скорость истечения воздуха, будет изменяться коэффициент избытка воздуха.

При новом значении коэффициента избытка воздуха  $\alpha'$ , чтобы скорости истечения газа и воздуха были равными, величина  $\frac{a}{s}$  должна быть определена из соотношения

$$\alpha' V_0 = \frac{s' - a}{a},$$

$$\text{но } \alpha' = \alpha \frac{\omega^s}{\omega^r}, \text{ следовательно, } \alpha \frac{\omega^s}{\omega^r} V_0 = \frac{s' - a}{a},$$

$$\text{так как } \alpha V_0 = \frac{s - a}{a} \text{ то } \frac{\omega^s}{\omega^r} \cdot \frac{s - a}{a} = \frac{s' - a}{a}.$$

Отсюда

$$s' = (s - a) \frac{\omega^s}{\omega^r} + a, \quad (32)$$

при

$$\omega^s = \omega^r$$

$$s' = s.$$

Таблица 9

Расчетная длина диффузионного факела при неравных скоростях истечения газа и воздуха; горелка плоская трехщелевая

№ п.п.	Наименование величин	Обозначен. и размерность	Скорость истечения					
			$\frac{200}{170}$	$\frac{200}{200}$	$\frac{200}{225}$	$\frac{200}{240}$	$\frac{200}{260}$	$\frac{200}{300}$
1	Эквивалентная толщина слоя $s'$ . . . . .	<i>мм</i>	5,25	6,0	6,63	7,0	7,5	8,5
2	Характеристический параметр . . . . .	$E = \frac{\pi}{2} \left( \frac{c_2}{ic_0} - \frac{a}{s'} \right)$	0,03	0,065	0,091	0,104	0,118	0,143
3	<i>exponent CZ</i> . . . . .	$\frac{k \pi^2 z}{w^r (s')^2}$	0,053	0,0412	0,0337	0,0302	0,0262	0,0205
4	Длина диффузионного факела (расчетн.) . . .	<i>см</i>	53,8	48,7	47,5	47,0	46,5	44,0
5	Отноше- ние   Длина наблюден. Длина рассчитан.	—	$\frac{48,0}{53,8} = 0,89$	$\frac{44,0}{48,7} = 0,9$	$\frac{43,0}{47,5} = 0,9$	$\frac{42,0}{47,0} = 0,89$	$\frac{41,0}{46,5} = 0,88$	$\frac{40,0}{44,0} = 0,91$



Таким образом, из соотношения (32) можно определить значение эквивалентной толщины по действительным размерам плоскощелевой горелки и скоростям истечения газа и воздуха.

Введение понятия об эквивалентной толщине слоя позволяет воспользоваться для расчета длины диффузионного факела ранее выведенными

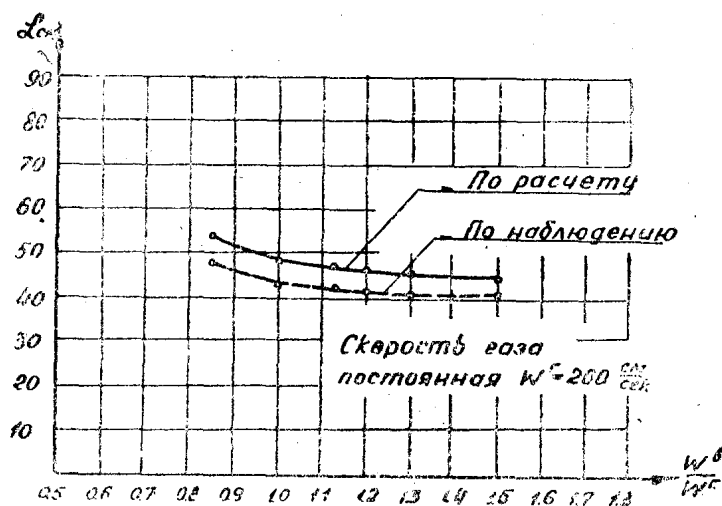


Рис. 7. Длина диффузионного факела при неодинаковых скоростях истечения газа и воздуха

уравнениями, если в эти уравнения подставить значение эквивалентной толщины слоя  $s'$  и скорость истечения газа  $w_г$ .

Ниже приведен расчет длины диффузионного факела для наблюдаемых случаев (табл. 8), расчетные величины представлены в табл. 9 и для сопоставления наблюдаемых и расчетных величин приведен график на рис. 7.

#### Д. Процесс горения и распределение температуры по длине диффузионного факела

Довольно распространенным является мнение о том, что процессы горения и тепловыделения по длине диффузионного факела равномерны, вследствие чего полагают, что и температура по длине диффузионного факела является более или менее постоянной. Для экспериментальной проверки такого рода предположений нами исследован частично химический состав продуктов горения и температура факела.

Для определения состава продуктов горения по длине факела плоская трехщелевая горелка помещалась в вертикальную шахту высотой 80 см, имеющую форму усеченного конуса и открытую сверху для свободного выхода продуктов горения. На боковой поверхности шахты сделаны два отверстия: нижнее на высоте 210 мм и верхнее на высоте 570 мм от устья горелки. Через эти два отверстия отсасывались пробы на анализ, путем введения в факел тонкой фарфоровой трубки по вертикальной оси факела. Анализом определялось содержание в продуктах горения лишь  $CO$ ,  $O_2$  и  $CO_2$  с помощью газоанализатора типа Орса. Данные газового анализа следует рассматривать как ориентировочные, так как полный газовый анализ не производился, хотя по содержанию  $O_2$  можно судить о степени завершенности горения, а по содержанию медленно горящей окиси углерода  $CO$  можно составить представление о полноте горения. Результаты газового анализа обработаны для следующих условий диффузионного горения: скорости истечения газа и воздуха из трехщелевой горелки равны 2 м/сек, что соответствует чисто диффузионному горению, теоре-

тическая длина факела (согласно табл. 5) равна 48,7 см, а действительная длина согласно табл. 3 равна 44 см; коэффициент избытка воздуха  $\alpha = 1,33$ . В табл. 10 приведены данные газового анализа для вышеуказанных условий диффузионного горения.

Таблица 10

Данные газового анализа по длине диффузионного факела

Составные части газа	Число объем. в газе	Число объем. из воздуха	Горюч. смесь		Продукты полного горения по расчету (без вод. пар.)		Газов. анализ	
			Число объем.	%	Число объем.	%	Нижняя проба в %	Верхняя проба в %
CO <sub>2</sub>	7,4	—	7,4	1,20	51,7	10,80	4,0	10,6
O <sub>2</sub>	5,9	105,0	110,9	18,50	26,2	5,47	12,0	6,0
CO	14,0	—	14,0	2,34	—	—	2,5	0,2
H <sub>2</sub>	37,0	—	37,0	6,17	—	—	—	—
CH <sub>4</sub>	27,5	—	27,5	4,56	—	—	—	—
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	1,4	—	1,4	0,23	—	—	—	—
2	6,8	395,0	401,8	67,0	401,8	83,73	—	—
	100	500	600	100	479,7	100		

Для большей наглядности на рис. 8 построены линии и точки, характеризующие данные газового анализа; на оси абсцисс отложена теоретическая длина диффузионного факела равная 487 мм и точки отбора проб газа для анализа—на расстоянии 21 см и 57 см от устья горелки.

На оси ординат—% содержания газов по объему. Прямая штриховая линия O<sub>2</sub> начинается на оси ординат с 18,5% (содержание кислорода в начальной смеси) и кончается на 5,47% (содержание кислорода в продуктах полного горения), при этом предполагается, что выгорание кислорода равномерное по длине факела. В нижней точке отбора газа обнаружено 12% кислорода (O<sub>2</sub>) вместо 12,8% и в верхней точке отбора 6,0% вместо 5,47%. Вторая штриховая прямая линия CO<sub>2</sub> имеет координаты: вначале 1,2% (содержание CO<sub>2</sub> в исходной смеси) и в конце 10,6% (содержание CO<sub>2</sub> в продуктах полного горения), при этом предполагается, что образование углекислого газа является равномерным по длине факела. В нижней точке отбора обнаружено 4% CO<sub>2</sub> вместо 5,4% и в верхней—10,6% вместо 10,8%. Третья штриховая линия CO имеет координаты: вначале 2,34% (содержание CO в исходной смеси) и в конце 0%. В нижней точке отбора обнаружено 2,5% вместо 1,4% и в верхней—0,2% вместо 0%.

Хотя, как указывалось выше, результаты анализа не дают возможности вполне отчетливо судить о развитии процесса горения по длине факела вследствие малого числа точек отбора проб газа и неполного газового анализа, но некоторое представление об этом все же можно составить. Так, можно считать, что практически процесс горения заканчивается на длине 570 мм, так как содержание CO—0,2%; можно без сомнения утверждать, что на этой длине в продуктах горения должны отсутствовать H<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub>, так как H<sub>2</sub> имеет наибольший коэффициент диффузии и так как CH<sub>4</sub> в

процессе горения распадается на  $\text{CO}$  и  $\text{H}_2$ , которые и вступают в реакцию горения. Затем, можно также считать, что кислород убывает в факеле значительно быстрее, чем при развитии равномерного горения, вследствие того что в начальной стадии горения преимущественно и с большой скоростью выгорает водород по указанной выше причине; об этом же свидетельствует и анализ на  $\text{CO}_2$ —увеличение  $\text{CO}_2$  происходит медленнее, чем при предположительном равномерном горении. Ввиду того, что ука-

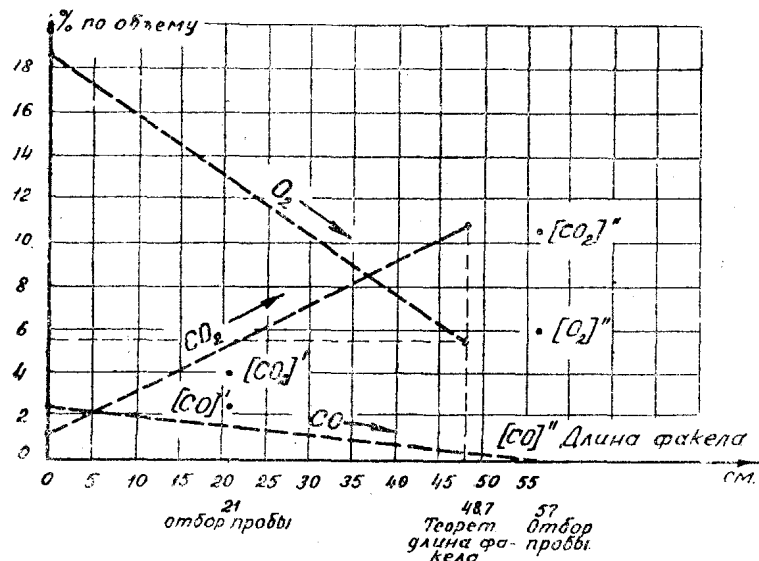


Рис. 8. Газовый анализ по длине диффузионного факела

занные выводы являются предположительными и лишь частично подкрепленными настоящими опытами, возникает необходимость провести более тщательное исследование о выгорании индивидуальных газов из смеси по длине факела, что и выполнено в специальной работе о структуре пламени.

Измерение температуры по длине факела производилось 10 термопарами Pt—PtRh, расположенными на штативе по высоте факела. Фиксирование показаний э.д.с. термопар производилось на одном гальванометре, к которому присоединялась общая панель с 10 контактами. Термопары вводились в факел пламени голыми (незащищенными) спаями. Несомненно, что голый спай оказывает каталитическое влияние на процесс горения, но мы считаем, что это влияние до известной степени компенсируется неточностью измерения действительной температуры другими способами. С этой точки зрения является ценным указание Ленинградского научно-исследовательского теплотехнического института: „Несравненно удобнее для измерения температуры пламени голые термопары, которые благодаря малому коэффициенту излучения и малому диаметру, обеспечивающему хорошую теплопередачу, дают температуру близкую к истинной. В случае кратковременных замеров платиновые температуры могут служить довольно длительный промежуток времени без каких-либо изменений их свойств. При работе голый Pt—PtRh термоэлемент после ряда изменений (10—15) в сильно восстановительной атмосфере и температурах до  $1500^\circ\text{C}$  не показал никаких изменений э.д.с. Проверочная градуировка, произведенная весьма тщательно, совпала с первоначальной с точностью до  $0,02 \mu\text{V}$ “. [15]. На сильное каталитическое влияние платины указывает В. Ф. Копытов: „При температурах выше  $500^\circ\text{C}$  платина является сильным катализатором для реакций горения и термопара не дает верных показаний“; поэтому В. Ф. Копытов при своих исследованиях горения газа производил измерения температуры Ni—NiCr термопарой [5]. Од-

нако известно, что и эти металлы также каталитически влияют на процесс горения, хотя и в меньшей степени, чем платина.

В наших опытах по высоте факела термопары располагались в следующем порядке: нижняя термопара на расстоянии 5 мм от устья горелки, затем через каждые 45 мм и последняя 10 термопара на высоте 410 мм. Результаты измерений температуры факела представлены в табл. 11 при следующих условиях опыта:

а) плоская трехщелевая горелка; скорости истечения газа и воздуха равны 200 см/сек, коэффициент избытка воздуха  $\alpha = 1,33$ ; газ и воздух холодные (без предварительного подогрева), теоретическая длина факела 48,7 см, действительно замеренная длина 44 см;

б) плоская трехщелевая горелка; скорости истечения газа и воздуха равны 200 см/сек, коэффициент избытка воздуха  $\alpha = 1,33$ ; газ и воздух предварительно подогреты до 220°C, теоретическая длина факела 32 см, действительно замеренная — 30 см;

в) плоская семищелевая горелка, скорости истечения газа и воздуха равны 200 см/сек; коэффициент избытка воздуха  $\alpha = 1,33$ ; газ и воздух холодные, теоретическая длина факела 48,7 см, действительно замеренная — 46 см.

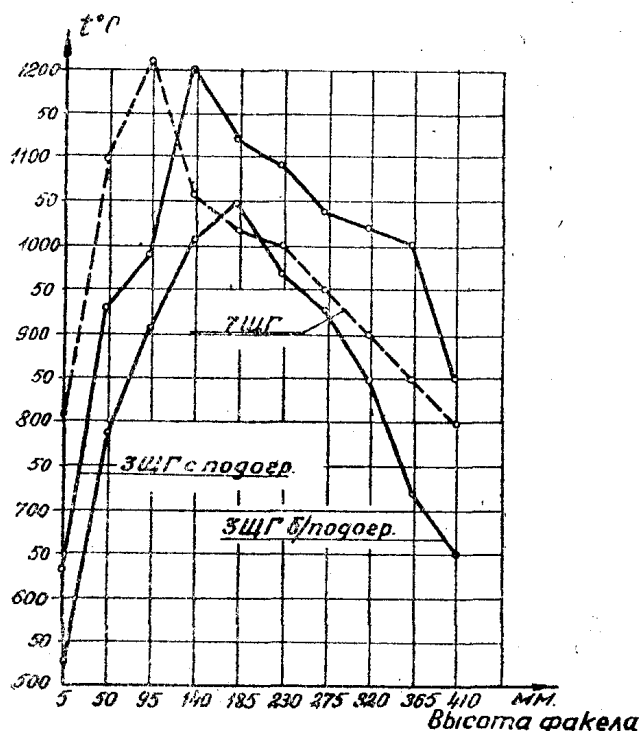


Рис. 9. Кривые распределения температуры по длине диффузионного факела

На рис. 9 изображены кривые распределения температуры по длине диффузионного факела, согласно данным табл. 11.

Таблица 11

Распределение температуры по длине диффузионного факела

№ точек замера	Высота от устья горелки мм	Распределение температуры °С		
		Опыт (а) трехщелевая горелка без подогрева °С	Опыт (б) трехщелевая горелка с подогревом °С	Опыт (в) семищелевая горелка без подогрева °С
1	5	530	630	810
2	50	790	930	1100
3	95	910	990	1210
4	140	1010	1200	1060
5	185	1050	1120	1020
6	230	970	1080	1000
7	275	930	1040	950
8	320	850	1020	900
9	365	720	1000	850
10	410	650	850	800

На основании данных, приведенных в табл. 11 и на рис. 9, можно сделать выводы о том, что распределение температуры по длине факела не-

равномерное, максимум температуры находится приблизительно на расстоянии от одной трети до половины длины факела.

## V. Опытное исследование диффузионного факела при сжигании водяного газа в экранированной топочной камере

### A. Описание экспериментальной установки

Все ранее описанные опыты по исследованию диффузионного факела производились в условиях истечения факела в атмосферу; направление факела было вертикальным. Учитывая, что в производственных условиях направление факела преимущественно горизонтальное, для исследования плоского горизонтального факела была сконструирована опытная экранированная топочная камера. Размеры внутри топочной камеры: ширина 320 мм, высота 500 мм, длина 2000 мм. По внутренним боковым сторонам камеры установлены 10 вертикальных плоских экранов, по 5 с каж-

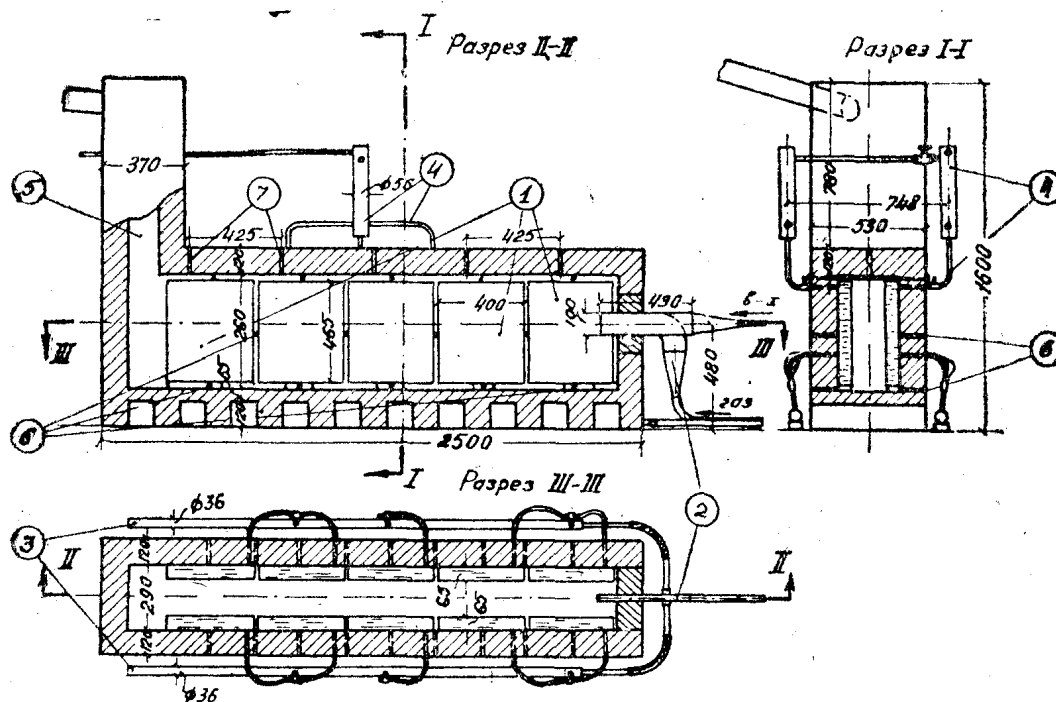


Рис. 10. Чертеж экранированной топочной камеры

1—экраны; 2—плоскощелевая диффузионная горелка; 3—трубы, подводящие воду; 4—трубы, отводящие нагретую воду; 5—дымоход; 6—отверстия для забора проб газа на анализ; 7—отверстия для термопар.

дой стороны. Экраны выполнены из листовой стали, толщиной 2 мм; размеры экрана: ширина 65 мм, высота 465 мм и длина 400 мм. Чертеж экранированной топочной камеры представлен на рис. 10.

Каждый экран имеет самостоятельный подвод холодной воды из коллектора. Нагретая вода также отбирается из каждого экрана. На опытной установке производились следующие измерения: 1) температура холодной воды, поступающей в экраны; 2) температура нагретой воды, выходящей из экранов; измерение температуры воды производилось ртутными термометрами; 3) количество поступающей воды путем взвешивания; 4) температура в топочной камере; для этой цели установлены: на расстоянии 20 см от устья горелки Pt—PtRh термопары, затем три термопары Fe—Const на

расстоянии 45 см одна от другой и у последнего пятого экрана—ртутный термометр. Для Pt—PtRh термодпары—отдельный гальванометр и для 3 Fe—Const термодпар—общий гальванометр с переключателем; 5) забор проб газа для анализа; для этой цели в кладке топочной камеры между экранами заложены металлические трубки, через которые и производился отсос газа для анализа; по высоте камеры отсасывающие трубки располагались на половине высоты камеры в свету; 6) расход газа учитывался с помощью острой диафрагмы в газопроводе и диффманометра; 7) расход воздуха учитывался с помощью острой диафрагмы на воздухопроводе и диффманометра; воздух подавался в систему центробежным вентилятором.

Общая схема опытной установки с указанием мест измерений представлена на рис. 11.

Перед началом производства измерений устанавливается стационарный режим; подача воды в экраны регулируется так, чтобы в каждый экран поступало одинаковое количество, это достигается путем взвешивания воды и регулировкой соответствующих краников; затем включается отсасывающий вентилятор и подается в камеру газ, где поджигается и включается нагнетающий воздушный вентилятор. Соотношение между количеством воздуха и газа устанавливается заранее и регулируется вентилями. Начиная с того момента, как температура вытекающей из каждого экрана воды устанавливается неизменной, производится запись всех измеренных величин.

#### Б. Результаты исследования диффузионного факела водяного газа в экранированной топочной камере

На опытной установке были выполнены две серии опытов в соответствии с поставленными задачами: первая серия опытов—при одинаковых скоростях истечения газа и воздуха от 0,973 м/сек до 2,08 м/сек и вторая серия опытов—при неодинаковых скоростях истечения газа и воздуха. В каждой серии опытов выполнено по 7 полных испытаний.

Для организации диффузионного факела применялась плоская семищелевая горелка, имеющая следующие размеры: внутренняя газовая щель шириной 2 мм, затем две щели, облегающие внутреннюю, размерами по ширине 7,5 мм каждая, затем 2 газовые щели шириной по 2 мм каждая и наконец две наружные воздушные щели шириной по 3,75 мм каждая. Общая ширина воздушно-газового потока  $3,75 + 2 + 7,5 + 2 + 7,5 + 2 + 3,75 = 28,5$  мм; длина щелей 60 мм. Поперечное сечение газовых щелей  $3 \cdot 0,002 \cdot 0,060 = 0,00036$  м<sup>2</sup>; поперечное сечение воздушных щелей  $2 \cdot 0,00375 \cdot 0,060 + 2 \cdot 0,0075 \cdot 0,060 = 0,00135$  м<sup>2</sup>.

При равенстве скоростей истечения газа и воздуха соотношение между количествами их определится из уравнения

$$\alpha V_0 = \frac{F_{г.щ.}}{F_{в.щ.}}$$

Здесь  $F_{г.щ.} = 0,00135$  м<sup>2</sup>,

$F_{в.щ.} = 0,00036$  м<sup>2</sup>,

$V_0 = 2,5$  м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> — теоретически необходимое количество воздуха для сжигания водяного газа,

отсюда

$$\alpha = \frac{0,00135}{2,5 \cdot 0,00036} = 1,5.$$

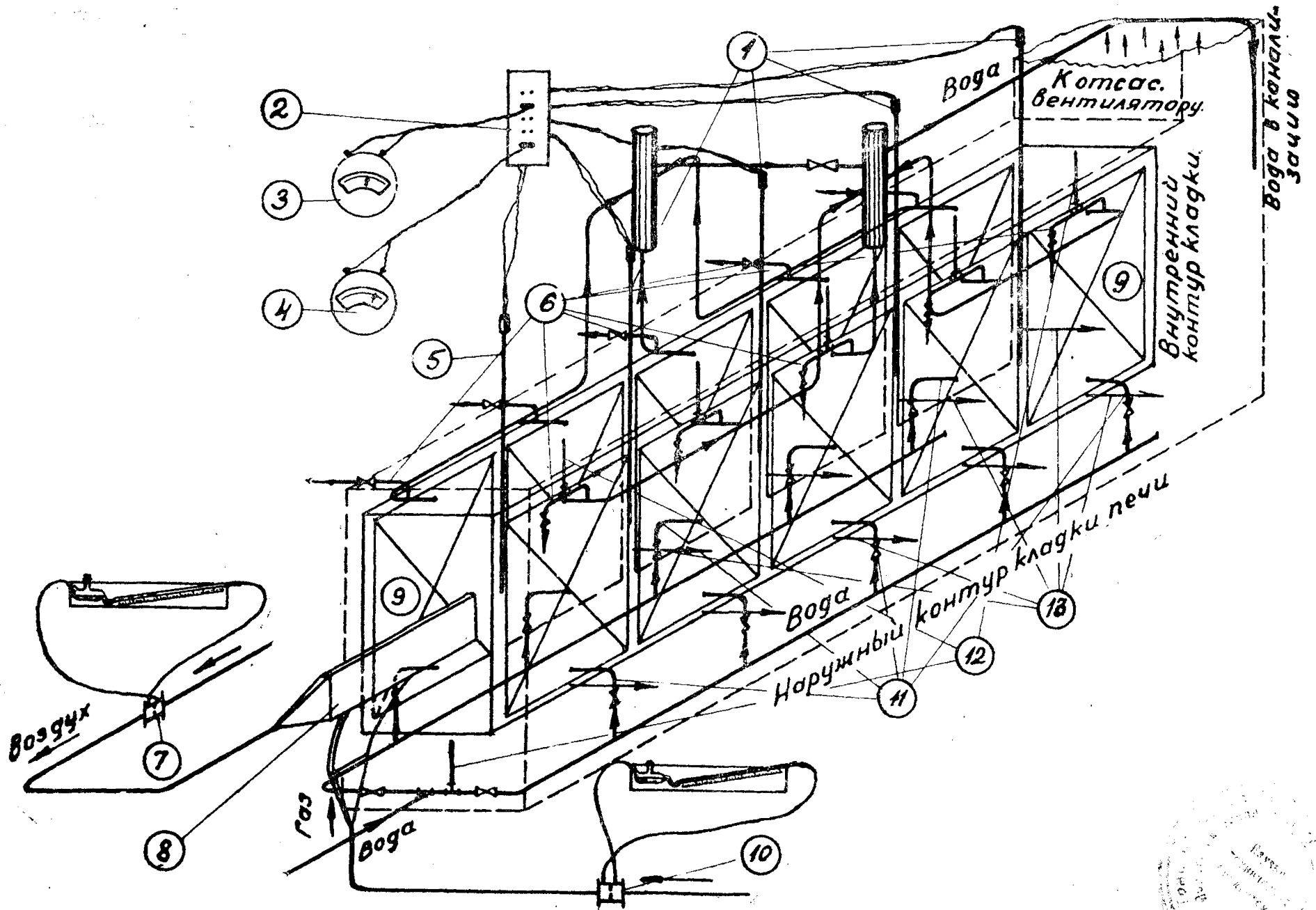


Рис. 11. Общий вид экранированной топочной камеры.

1—термопары Fe—Const; 2—переключатель; 3—гальванометр для Fe—Const термопар; 4—гальванометр для Pt—Pt Rh термопар; 5—Pt—Pt Rh термопара; 6—отводы воды из экранов; 7—диафрагма на воздухопроводе; 8—плоско-щелевая диффузионная горелка; 9—экраны; 10—диафрагма на газопроводе; 11—подводы воды к экранам; 12—термометры для измерения температуры воды; 13—места отбора газа на анализ.

Сборники воды и весы на чертеже не показаны.

Таблица 12

Результаты исследования диффузионного горения водяного газа в экранированной камере.  
Серия I. При одинаковых скоростях истечения газа и воздуха

№ опытов	Расход		Коэффициент избытка	Скорость истечения		Распределение температуры по длине факела на расстоянии от устья горелки						Расход воды и подъем температуры ее в экранах						Общий расход воды литр/час	Анализ продуктов горения в дымоходе		
	газ	воз-дух		газ	воз-дух	20	65	110	155	200	I и II экраны		III экран		IV и V экраны		CO <sub>2</sub> %		CO %	O <sub>2</sub> %	
	$\frac{м^3}{час}$	$\frac{м^3}{час}$		$\frac{м}{сек}$	$\frac{м}{сек}$	см	см	см	см	см	В дымоходе	расход литр/час	$\Delta t^\circ$	расход литр/час	$\Delta t^\circ$	расход литр/час					$\Delta t^\circ$
						°C	°C	°C	°C	°C											
1	1,26	4,76	1,51	0,97	0,98	730	550	440	325	150	80	25,0	70	15	30	30	25	70	10,6	0,1	7,00
2	1,60	6,00	1,50	1,24	1,23	800	690	540	420	190	165	27,0	80	14,8	35	34	28	75,8	10,7	0,0	7,10
3	1,78	6,65	1,49	1,37	1,35	800	720	600	465	200	118	30,0	82	18	39	36	29	84,0	10,6	0,1	7,15
4	1,98	7,30	1,48	1,53	1,50	960	690	580	440	190	115	61,0	50	15	50	31	29	107	10,6	0,1	7,20
5	2,18	8,25	1,51	1,68	1,70	820	670	560	450	200	115	62,0	50	15	59	32	30	109	10,7	0,0	7,00
6	2,52	9,50	1,50	1,94	1,95	750	840	700	515	260	130	60,0	62	18	70	25	35	103	10,55	0,1	7,1
7	2,70	10,0	1,49	2,08	2,06	740	860	730	535	270	140	65	55	19	80	26	36	110	10,55	0,1	7,2



В экранированной топочной камере сжигался водяной газ, получаемый в газогенераторах при газификации Араличевского каменного угля; состав сухого водяного газа следующий:  $\text{CO}_2$  — 4%,  $\text{CO}$  — 30,5%,  $\text{H}_2$  — 53,4%,  $\text{CH}_4$  — 5,2% и  $\text{N}_2$  — 6,9%. Теоретически необходимое количество воздуха  $V_0 = 2,5 \text{ м}^3/\text{м}^3$ . При избытке воздуха  $\alpha = 1,5$  состав продуктов горения должен быть следующий:  $\text{CO}_2$  — 10,7%,  $\text{O}_2$  — 7,1%,  $\text{N}_2$  — 82%.

Для расчета теоретической длины диффузионного факела необходимо знать коэффициент диффузии. Коэффициент диффузии вычислен равным

$$k = 0,3 \text{ см}^2/\text{сек.}$$

В табл. 12 представлены результаты 1-й серии испытания, т. е. при одинаковых скоростях истечения газа и воздуха.

Из данных табл. 12 видно, что сгорание газа в камере происходит почти полностью, так как содержание  $\text{CO}$  в отходящих газах незначительное; по мере увеличения скорости истечения газа и воздуха удлиняется диффузионный факел и смещается зона высоких температур по длине факела.

В табл. 13 приведен тепловой баланс экранированной топочной камеры, полученный в этой же серии испытаний.

Таблица 13

Тепловой баланс экранированной топочной камеры диффузионного горения.

Серия 1

№ опытов	Тепло нагревания воды в экранах				Тепло уходящих газов		Тепло горения газов	Невязка баланса (потери)	
	I и II	III	IV и V	Всего	ккал/час	объем прод. горения $\text{м}^3/\text{час}$		ккал/час	%%
	ккал/час	ккал/час	ккал/час	ккал/час					
1	1750	450	750	2950	150	5,45	3400	300	8,8
2	2160	520	950	3630	232	6,90	4320	458	10,5
3	2460	700	1050	4210	290	7,70	4800	300	6,3
4	3050	750	900	4700	324	8,56	5450	426	7,8
5	3100	885	960	4945	348	9,42	5900	607	10,1
6	3720	1260	880	5860	452	10,9	6900	588	8,5
7	3575	1520	936	6031	540	11,7	7280	709	9,2

Из данных теплового баланса видно, что по мере удлинения диффузионного факела и смещения зоны более высоких температур увеличивается тепловая напряженность среднего III экрана; так, если тепловую напряженность последнего V экрана принять за единицу, то тепловая напряженность среднего III экрана характеризуется такими соотношениями (от первого опыта к последнему)

$$\frac{1,2}{1}; \frac{1,09}{1}; \frac{1,3}{1}; \frac{1,67}{1}; \frac{1,83}{1}; \frac{2,86}{1}; \frac{3,25}{1}.$$

Вторая серия опытов по исследованию диффузионного факела водяного газа в экранированной топочной камере была выполнена при неодинаковых скоростях истечения газа и воздуха. Скорости истечения газа изменялись от  $0,973 \text{ м/сек}$  до  $2,08 \text{ м/сек}$  и скорости истечения воздуха от  $0,715 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$  до  $1,42 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$  соответственно. Конструкция горелки прежняя, плоская семищелевая.

Таблица 14

Результаты исследования диффузионного горения водяного газа в экранированной топочной камере.  
Серия II — при неодинаковых скоростях истечения газа и воздуха

№ опытов	Расход			Скорость истечения		Распределение температуры по длине факела на расстоянии от устья горелки						Расход воды и повышение температуры ее в экранах					Общий расход воды литр час	Анализ-продуктов горения в дымоходе			
	газ	воздух		газ	воздух	20	65	110	155	200	В дымоходе	I и II экраны		III экран		IV и V экраны		CO <sub>2</sub> %	CO %	O <sub>2</sub> %	
		$\frac{м^3}{час}$	$\frac{м^3}{час}$									Кэф. избытка воздуха	$\frac{м}{сек}$	$\frac{м}{сек}$	$\frac{см}{°C}$	$\frac{см}{°C}$					$\frac{см}{°C}$
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16		17	18	19	20
1	1,26	3,47	1,10	0,973	0,715	400	800	510	355	102	53	24	61	12,6	27,5	24,7	22	60,9	11,3	0,5	1,62
2	1,54	4,26	1,11	1,18	0,88	410	820	590	465	200	63	35	70	15,8	31,5	28,9	25	79,7	11,5	0,4	1,60
3	1,78	4,95	1,11	1,37	1,02	600	850	600	440	232	110	86	35	44	15	40	15	170	11,0	0,8	1,7
4	1,97	5,50	1,12	1,52	1,13	690	880	632	470	230	115	90	38	50	17	40	15	180	11,2	0,6	1,65
5	2,18	6,00	1,10	1,68	1,23	700	820	654	490	210	120	90	38	60	17	50	15	200	11,1	0,7	1,69
6	2,34	6,55	1,12	1,80	1,35	700	830	678	510	220	116	90	40	60	20	50	18	200	11,8	0,2	1,59
7	2,54	6,90	1,08	1,96	1,42	730	850	710	520	150	112	93	41	61	21	50	19	204	11,25	0,55	1,60

При проведении этой серии испытаний было желательно выявить влияние неодинаковых скоростей истечения газа и воздуха на распределение температуры в экранированной топочной камере и на длину диффузионного факела. Методика измерений применялась та же, что и при выполнении I серии опытов.

В табл. 14 представлены результаты II серии испытаний. При избытке воздуха  $\alpha = 1,1$  состав продуктов горения должен быть следующий:  $\text{CH}_2 - 11,9\%$ ,  $\text{O}_2 - 1,57\%$  и  $\text{N}_2 - 65,5\%$ .

В табл. 15 приведен тепловой баланс для II серии опытов.

Таблица 15

Тепловой баланс экранированной топочной камеры диффузионного горения.

Серия II

№ опытов	Тепло нагревания воды в экранах				Тепло уходящих газов		Тепло горения газа	Невязка баланса (теплопотери)	
	I и II	III	IV и V	Всего	объем м <sup>3</sup> час	ккал час		ккал час	ккал час
	ккал час	ккал час	ккал час	ккал час					
1	1470	346	542	2358	4,2	74	3400	168	4,95
2	2450	500	722	3672	5,1	106	4150	378	9,10
3	3000	660	600	4260	5,9	214	4800	326	6,9
4	3420	850	600	4870	6,55	250	5320	200	3,8
5	3420	1020	750	5190	7,25	286	5900	424	7,2
6	3600	1200	900	5700	7,8	300	6320	320	5,1
7	3820	1280	949	6049	8,45	312	6850	489	7,1

## В. Расчеты длины диффузионного факела водяного газа

А. Для I серии опытов — при истечении газа и воздуха с одинаковыми скоростями характеристический параметр решения дифференциального уравнения диффузии

$$E = \frac{\pi}{2} \left( \frac{c_2}{ic_0} - \frac{a}{s} \right).$$

Здесь  $c_2 = 0,21$ ,

$$i = 0,587.$$

Метод расчета величины  $i$  указан ранее на стр. 62

$$c_1 = 0,891,$$

$$c_0 = c_1 + \frac{c_2}{i} = 0,891 + \frac{0,21}{0,587} = 1,249,$$

$$a = 0,1 \text{ см},$$

$$s = 0,375 \text{ см},$$

$$E = \frac{3,14}{2} \left( \frac{0,21}{0,587 \cdot 1,249} - \frac{0,1}{0,375} \right) = 0,033;$$

из уравнения (14)

$$E = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin \frac{n \pi a}{s} \cos \frac{n \pi x}{s} e^{-\frac{kn^2 \pi^2 z}{\omega s^2}},$$

при  $x=0$  (так как  $E$  имеет положительное значение) находим:

для $\omega_1 = 0,98 \frac{м}{сек}$	$z_1 = 14 \text{ см};$
для $\omega_2 = 1,23 \frac{м}{сек}$	$z_2 = 18,2 \text{ см};$
для $\omega_3 = 1,36 \frac{м}{сек}$	$z_3 = 19,7 \text{ см};$
для $\omega_4 = 1,53 \frac{м}{сек}$	$z_4 = 22,8 \text{ см};$
для $\omega_5 = 1,68 \frac{м}{сек}$	$z_5 = 25,0 \text{ см};$
для $\omega_6 = 1,94 \frac{м}{сек}$	$z_6 = 29,0 \text{ см};$
для $\omega_7 = 2,08 \frac{м}{сек}$	$z_7 = 31,0 \text{ см}.$

Б. Для II серии опытов — при истечении газа и воздуха с неодинаковыми скоростями.

Расчет длины факела произведен по уравнению (14) и эквивалентная толщина слоя  $s'$  по формуле (32); результаты расчета приведены в табл. 16

Таблица 16

Длина диффузионного факела водяного газа при неодинаковых скоростях истечения газа и воздуха, горелка плоская семищелевая

№ п. п.	Наименование величин	Обозначение и размерность	Скорость истечения газа/воздуха см/сек						
			97,5 71,5	118 88	137 102	152 113	168 123	180 135	196 142
1	Эквивалентная толщина слоя	$s' \text{ см}$	0,31	0,305	0,305	0,305	0,302	0,306	0,299
2	Характеристический параметр	$E$	0,565	0,066	0,066	0,066	0,706	0,645	0,767
3	Длина диффузионного факела при $x = s'$ $K = 0,3 \text{ см}^2/\text{сек}$ $\omega_2 = var$	$z \text{ см}$	8,9	9,7	11,6	12,5	13,0	14,8	14,9

## VI. Выводы

В настоящей работе рассмотрены физико-математические теории диффузионного факела и подробно выявлены условия применимости их к исследованию процессов диффузионного горения. Ряд конкретных цифровых

решений наглядно показывает характер затруднений, возникающих при практическом пользовании математическим аппаратом теории диффузии и необходимость тех или иных упрощающих допущений; однако, несмотря на эти затруднения и допущения, должен быть сделан вывод о том, что предварительный расчет диффузионного факела необходим и вполне возможен, так как действительно наблюдаемые в опытах величины не столь уж резко отличаются от теоретически рассчитанных.

Строгое соблюдение условий чисто диффузионного горения в практике вряд ли возможно, в частности трудным является соблюдение принципа одинаковых скоростей истечения газа и воздуха, поэтому автором этой работы введено понятие об эквивалентной толщине диффузионного слоя и дано математическое выражение ее через действительные размеры диффундирующих слоев. Это позволяет использовать с достаточной степенью надежности математический аппарат теории диффузии при исследовании диффузионных потоков с неодинаковыми скоростями истечения.

Выполненные автором обширные опытные исследования диффузионного горения светильного и водяного промышленных газов в различных условиях, хотя и не отличаются большой точностью, но являются наиболее разносторонними по сравнению с экспериментальными исследованиями других авторов (кстати отметить, что число экспериментальных работ в этой области очень мало).

В выполненных автором экспериментальных исследованиях производились наблюдения:

- 1) влияние скорости истечения на длину диффузионного плоско-параллельного и концентрического факела;
- 2) влияние неодинаковых скоростей истечения газа и воздуха на длину диффузионного плоско-параллельного факела;
- 3) влияние температуры подогрева газа и воздуха на длину диффузионного факела;
- 4) распределение температуры по длине диффузионного факела;
- 5) неполный анализ продуктов горения по длине диффузионного факела;
- 6) диффузионный факел в экранированной топочной камере (температура, теплоотдача, тепловой баланс).

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Глинков М. А. и Калошин Н. А. — Уральская металлургия 1, 1940.
2. Иванцов Г. П. — Сборник работ Стальпроекта, 1936.
3. Казакевич Ф. П. и Дюндин Н. П. — Теория и практика металлургии, 5 — 6, 1940.
4. Китайгородский И. И. — Технология стекла, т. 1, 1939.
5. Копытов В. Ф. — Материалы по экономии топлива в печах, Труды ЦНИИМАШ, 83, 1938.
6. Копытов В. Ф. и Иванов В. К. — Домез, 6, 1935.
7. Ляховский Д. Н. — Советское котлотурбостроение, 4, 1940.
8. Ляховский Д. Н. и Сыркин С. Н. — Советское котлотурбостроение, 9, 1936.
9. Махов Н. С. — Советская металлургия 8 — 9, 1934.
10. Махов Н. С. — Труды Днепропетровского металлургического института, 4, 1940.
11. Норкин Н. Н. — Известия Томского политехнического института, т. 64, 1948.
12. Подгурский Л. В. — Теория и практика металлургии, 3, 1940.
13. Сычев Н. И. — Сборник Уральского отделения ВТИ, 5, 1940.
14. Тимофеев В. Н. и Сычев П. И. — Сборник Уральского отделения ВТИ, 5, 1940.
15. Труды Ленинградского научно-исследовательского теплотехнического института 3, 1932.
16. Шпильрейн Я. Н. — Таблицы специальных функций, 1, 1933.
17. Burke S., Schuman G. Ind. a. Eng. Chem., 20, 1928.
18. Гребер Г. и Эрк С. — Основы учения о теплообмене, 1936.
19. Herbig W. Steel, 91, 1934.
20. Пистор Р. — Реф. Советская металлургия, 1, 1932.
21. Rummel K. Arch. f. d. Eisenhüttenwesen, 1937.