



верхности охлажденные продукты горения и этим самым улучшить условия теплопередачи от пламенного потока к зеркалу ванны.

На значение искривления оси неизотермического факела также впервые обратил внимание В. Е. Грум-Гржимайло, назвав это явление газовым фонтаном [1]. В. Е. Грум-Гржимайло писал: „Ванна мартеновской печи является мешком, из которого остывшие газы не имеют естественного выхода и потому должны застаиваться. Для того, чтобы сбить их с пода, смешать с раскаленными газами пламени, газ и воздух, поступающие в рабочее пространство мартеновской печи, направляют на под... Для наварки пода нужно, чтобы пламя, направленное наклонными пролетами, могло касаться самой низкой его точки. Отсюда вытекает необходимость прежде всего выяснить, на какую глубину ниже нормального уровня газового потока нужно опустить струю раскаленных продуктов горения“.

И. Г. Есьман [4], подчиняя законы движения неизотермического газового факела законам гидродинамики и принимая, что вытекающая газовая струя под влиянием силы тяжести, направленной книзу, и подъемной силы, направленной кверху, движется по параболе, вывел формулу глубины погружения газового фонтана (вершины параболы)

$$H = \frac{w_0^2 T_0}{2g \Delta T} \sin^2 \alpha, \quad (1)$$

где  $H$  — м — глубина погружения газового фонтана (вершины параболы).

$w_0$  — м/сек — начальная скорость истечения газового потока,

$T_0$  — температура неподвижной газовой среды, заполняющей печь,

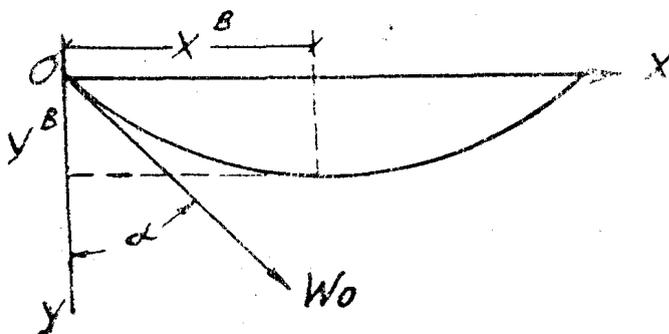
$\Delta T = T_1 - T_0$  — разность температур газового потока и неподвижной среды в начале истечения,

$\alpha$  — угол между начальным направлением потока и горизонтальной поверхностью,

$g = 9,81$  м/сек<sup>2</sup>.

Схема оси неизотермической струи изображена на фиг. 1.

И. Г. Есьман, рекомендуя уравнение (1) для практических расчетов, указывает на необходимость введения коэффициента скорости в зависимости от формы отверстия. В. Е. Грум-Гржимайло вводит в формулу И. Г. Есьмана



Фиг. 1. Схема траектории оси наклонного неизотермического факела.

$$H = k \frac{w_0^2 T_0}{2g \Delta T} \sin^2 \alpha \quad (2)$$

Следуя методике И. Г. Есьмана, выводится уравнение траектории газового фонтана

$$y = \frac{g \Delta T}{2w_0^2 T \cos^2 \alpha} x^2 \quad (3)$$

Длина горизонтального участка траектории до вершины газового фонтана равна

$$x = k \frac{w_0^2 T}{2g \Delta T} \sin 2\alpha \quad (4)$$

Если первоначальное направление газового потока горизонтальное, т. е.  $\alpha = 0$ , то из уравнения траектории потока (3) следует

$$y = \frac{g \Delta T}{2w_0^2 T} x^2. \quad (5)$$

Для удобства сопоставления формулы Грум-Гржимайло-Есьмана с результатами исследования других авторов приведем вышеуказанные формулы к безразмерному критериальному виду. Комплекс величин  $\frac{g \Delta T d}{T w_0^2}$  принято называть критерием Архимеда, поэтому в новом виде вышеприведенные уравнения будут: траектория потока, вытекающего через отверстие диаметром  $d$  под углом  $\alpha$  к оси абсцисс из (3)

$$\frac{y}{d} = \frac{1}{2} k Ar \left( \frac{x}{d \cos \alpha} \right)^2, \quad (6)$$

то же для потока, имеющего горизонтальное первоначальное направление при  $\alpha = 0$ ,

$$\frac{y}{d} = \frac{1}{2} k Ar \left( \frac{x}{d} \right)^2, \quad (7)$$

наибольшая глубина газового фонтана по схеме на фиг. 1

$$\frac{H}{d} = \frac{1}{2} k \frac{\sin^2 \alpha}{Ar}. \quad (8)$$

Расстояние по горизонтали до точки наибольшей глубины газового фонтана по схеме на фиг. 1

$$\frac{x}{d} = k \frac{\sin 2\alpha}{2 Ar}. \quad (9)$$

Для вертикального фонтана, направленного книзу при  $\alpha = 90^\circ$ ,

$$\frac{H}{d} = \frac{1}{2} \frac{k}{Ar} \quad (10)$$

В трудах Грум-Гржимайло и Есьмана нет опытных данных, которые подтверждали бы возможность уверенного использования их уравнений при исследовании распространения горящего газового факела, однако В. Е. Грум-Гржимайло неоднократно применяет уравнение наибольшей глубины газового фонтана при анализе работы ваннных плавильных (в частности мартеновских) печей.

В 1936 г. Г. Н. Абрамович [6] разработал теорию свободной турбулентной струи и вывел уравнение аэродинамической оси струи, имеющей первоначальное горизонтальное направление и искривленной гравитационными силами при неизотермическом истечении струи, в среду иной плотности. Первоначальное уравнение Абрамовича имеет вид

$$\frac{y}{d} = Ar \left( \frac{x}{d} \right)^2 \left[ 1,48 a \frac{x}{d} + 0,32 \right] \quad (11)$$

В этом уравнении величина  $a$  — коэффициент структуры струи, зависящий от формы поперечного сечения насадка, из которого происходит истечение струи. В частности для насадков круглой формы величина  $a$  изменяется в пределах от  $a = 0,066$  до  $a = 0,076$ , в среднем принимают  $a = 0,07$ ; для насадков прямоугольной формы  $a = 0,09 \div 0,12$ . Сводка значений  $a$  опубликована в статье И. А. Шепелева [7].

После того, как в 1938—1939 гг. Д. Н. Ляховский и С. Н. Сыркин [8, 9] опубликовали результаты выполненных ими обширных экспериментальных исследований по изучению искривления факела при истечении в среду другой температуры и указали на большое расхождение опытных данных с теорией Абрамовича, вследствие недоучета последним при выводе уравнений вертикальной составляющей силы сопротивления, Г. Н. Абрамович в своем труде, опубликованном в 1948 г. [10], дал новое уравнение для расчетов траектории неизотермической струи, имеющей первоначальное горизонтальное направление в виде

$$\frac{y}{d} = Ar \left( \frac{x}{d} \right)^2 \left[ 0,72 a \frac{x}{d} + 0,31 \right] \quad (12)$$

Из сопоставления уравнений (11) и (12) видно, что траектория подъема оси факела, вычисляемая по уравнению (12), менее крутая, чем по уравнению (11); Г. Н. Абрамович объясняет неточность своего первого уравнения (11) тем, что при выводе уравнения (11) предполагалось расходование подъемной Архимедовой силы целиком на сообщение вертикального ускорения и не учитывался расход части ее на сообщение вертикальной скорости газа, увлекаемого факелом из окружающей среды. В уравнении (12) это учтено. Г. Н. Абрамович сопоставил расчетные данные по уравнению (12) с опытными данными Ляховского и Сыркина и пришел к заключению, что предложенное им уравнение (12) полностью удовлетворяет опытным данным.

Для удобства сопоставления опытных данных с расчетами И. А. Шепелев предложил обработать результаты опытных данных в виде обобщенной кривой в координатах—ось абсцисс  $\frac{x}{d}$  и ось ординат  $\frac{y}{d} \cdot \frac{1}{Ar}$ .

Как уже упоминалось, Д. Н. Ляховский и С. Н. Сыркин произвели обширное опытное исследование по изучению распространения неизотермической струи [8; 9]. Ими исследованы 22 струи, измерено более 100 температурных и скоростных полей, всего произведено более 2000 измерений, кропотливо обработанных. Опыты производились с насадками диаметром 50, 100, 150 и 200 мм, температура вытекающего воздушного факела достигала 270°C, скорость истечения изменялась от 1,37 м/сек до 6,4 м/сек и значение критерия Архимеда от 0,0055 до 6,275. Результаты своих исследований Ляховский и Сыркин обработали в виде кривых в координатах  $\frac{x}{d}$ ,  $\frac{y}{d}$  для

различных значений  $Ar$ , но обобщенного уравнения они не предложили, мотивируя тем, что для аналитического решения задачи о неизотермическом истечении нехватает данных о силе сопротивления, возникающей при подъеме факела и что более плодотворным методом решения подобной задачи является экспериментальное исследование. При обработке экспериментальных данных методами теории подобия они рекомендуют в качестве определяющего критерий Архимеда, характеризующий отношение между подъемной силой единицы объема  $g(\rho_0 - \rho)$  и инерциальной силой, пропорциональной величине  $\rho \frac{w_0^2}{d}$ . В качестве практического примера применения полученных Ляховским и Сыркиным эксперименталь-

ных зависимостей они решают задачу—находят отклонение книзу оси факела воздуха, вытекающего с начальной температурой  $100^{\circ}\text{C}$  через окно прямоугольного сечения  $1,2 \times 0,8$  м со скоростью  $w_0=5,1$  м/сек. По поводу этого примера необходимо заметить, что вызывают большое сомнение следующие обстоятельства: а) пример решается для струи прямоугольного сечения, а используются опытные данные для струи круглого сечения, между тем как коэффициенты структуры струи в обоих случаях различны; б) размеры окна в примере значительно отличаются от размеров исследованных насаждений. По поводу искривления неизотермического факела, имеющего первоначально наклонное направление, Ляховский и Сыркин считают, что полученные ими экспериментальные данные с известным приближением могут быть использованы и для слабо наклонных к горизонту насаждений, если отсчитывать  $\frac{y}{d}$  от наклонной геометрической оси факела. Для сильно

наклонных насаждений под углом  $> 20^{\circ}$  и для вертикальных струй, бьющих вверх или вниз, необходимо, по их мнению, ввести еще один определяющий критерий—угол наклона.

Что же касается искривления оси горящего факела, то Ляховский и Сыркин предостерегают о необоснованности применения для горящего факела опытных данных, полученных при исследовании нагретых струй; они считают, что горящий факел будет искривляться сильнее, чем факел без тепловыделения; они намечали провести исследование искривления горящего факела в 1939 г., но до сих пор результаты исследования не опубликованы.

В 1940 г. И. А. Шепелев опубликовал работу [11] о распространении теплых и холодных струй воздуха; в этой работе им выведено уравнение аэродинамической оси неизотермической струи, вытекающей из насаждения, расположенного под углом  $\alpha$  к горизонту

$$\frac{y}{d} = Ar \left( \frac{x}{d \cos \alpha} \right)^2 \left[ 0,51 a \frac{x}{d \cos \alpha} + 0,35 \right] \pm \frac{x}{d} \operatorname{tg} \alpha \quad (14)$$

Знак  $+$  перед последним членом уравнения берется, когда направление вверх и знак  $-$  когда направление вниз. При горизонтальном истечении, когда  $\alpha=0$ , уравнение оси потока будет

$$\frac{y}{d} = Ar \left( \frac{x}{d} \right)^2 \left[ 0,51 a \frac{x}{d} + 0,35 \right] \quad (15)$$

Сравнивая (15) и (12), замечаем, что подъем оси потока менее крутой по уравнению Шепелева (15), чем по уравнению Абрамовича (12), и результаты, полученные по уравнению (15), являются близко совпадающими с опытными данными Ляховского и Сыркина, что особенно наглядно обнаруживается при построении обобщенной кривой в координатах  $\frac{y}{dAr}$ ,  $\frac{x}{d}$ .

Координаты вершины параболической траектории струи (газового фонтана), вытекающей наклонно в соответствии со схемой на фиг. 1, по уравнению Шепелева получаются по методу нахождения максимального значения функции  $f' \left( \frac{x}{d} \right) = 0$ , т. е.

$$\text{абсцисса вершины} \left( \frac{x}{d} \right)^B = 0,583 \cos \alpha \sqrt[3]{\frac{\sin^2 \alpha}{aAr^2}}, \quad (16)$$

$$\text{ордината вершины} \left( \frac{y}{d} \right)^B = 0,35 \sin \alpha \sqrt[3]{\frac{\sin^2 \alpha}{aAr^2}}. \quad (17)$$

Наибольшая высота вертикального фонтана ( $\alpha = 90^\circ$ )

$$\frac{y_{max}}{d} = \frac{0,35}{\sqrt[3]{aAr^2}}, \quad (13)$$

И. А. Шепелев иллюстрирует применение выведенных им соотношений на 2 примерах истечения холодного и теплого воздуха.

По поводу выведенных Шепелевым соотношений в сборнике под редакцией В. А. Туркуса [12] высказано мнение, что выведенные уравнения не могут быть распространены на все случаи, встречающиеся в практике, и, в частности, на системы сосредоточенной подачи в помещения значительных количеств воздуха.

Вопросам искривления оси неизотермического факела и настильности пламени в мартеновских печах посвящено большое теоретическое исследование М. А. Глинкова [3]. В своем исследовании М. А. Глинков, так же как и Лаховский и Сыркин [8;9], подвергает критике уравнения Грум-Гржимайло-Есьмана (2;4) и в дальнейшем использует в качестве исходного уравнение свободной турбулентной струи Г. Н. Абрамовича в прежней редакции, т. е. неисправленное (11), неточность которого, как указывалось выше, признал и сам автор и взамен которого впоследствии он дал новое уточненное уравнение (12). Желая применить раннее уравнение Абрамовича (11) к исследованию распространения горящего факела, в котором есть тепловыделение и лучистый теплообмен с ограждающими стенками, М. А. Глинков вводит поправочный коэффициент со средним значением 0,7 и в дальнейшем использует уравнение (10) Абрамовича: для горизонтальной струи в виде

$$-\frac{y}{d} = kAr \left( \frac{x}{d} \right)^2 \left[ 1,48 a \frac{x}{d} + 0,32 \right] \quad (19)$$

и для наклонной струи в виде

$$-\frac{y}{a} = kAr \left( \frac{x}{d \cos \alpha} \right)^2 \left[ 1,48 a \frac{x}{d \cos \alpha} + 0,32 \right] \pm \frac{x}{d} \operatorname{tg} \alpha \quad (20)$$

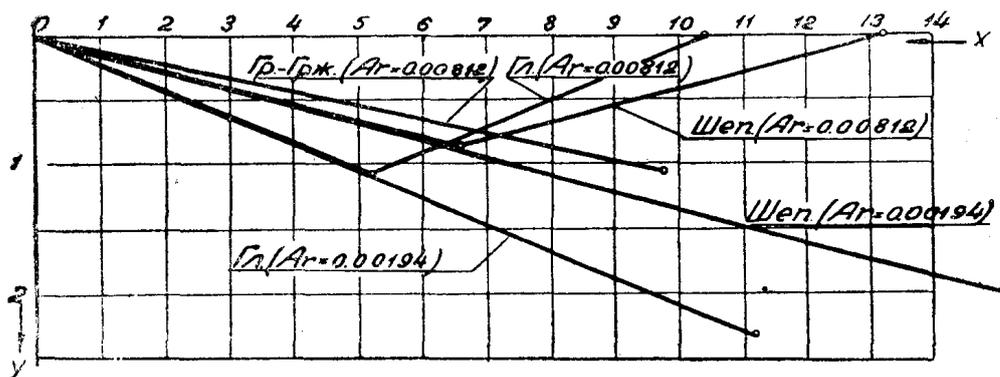
Для нахождения координат вершины газового фонтана (в соответствии со схемой на фиг. 1) М. А. Глинков определяет максимум функции из уравнения (20). Полученные при этом формулы чрезвычайно громоздки; хотя М. А. Глинков в цитируемой работе применяет свои уравнения для решения ряда практических задач из практики работы мартеновских печей, однако следует признать, что основа для вывода уравнений неточная, так как при выводе их использовано раннее уравнение Абрамовича.

Для наглядного представления сопоставим расчетные данные по определению траектории наклонной газовой струи по уравнениям: Грум-Гржимайло-Есьмана (уравнения 8 и 9), Шепелева (уравнения 16 и 17) и Глинкова (20) для различных значений критериев Архимеда. Результаты расчетов и графическое изображение траектории оси потока наклонного под углом  $\alpha = 12^\circ$  приведены на фиг. 2. Из данных таблицы и характера кривых видно, во-первых, что обнаруживается резкая разница значений координат вершины изогнутой оси, в особенности координаты  $x_{max}$  по данным указанных авторов и, во-вторых, что наиболее пологая траектория оси потока получается по уравнениям Грум-Гржимайло-Есьмана и наиболее крутая — по уравнениям Глинкова. Объясняется это тем, что по теории газовых фантанов Грум-Гржимайло-Есьмана не учитывается вовлечение в поток газов из окружающей среды, а в уравнении Глинкова не учитывается расход энергии вертикальной составляющей скорости на ускорение вовле-

ченного потока; на эти стороны было обращено внимание еще Ляховским и Сыркиным [8;9].

И. К. Неймарк [13] сделал попытку вывести уравнение траектории струи острого вторичного дутья холодного воздуха, подаваемого в топку с учетом тепловыделения в струе за счет горения летучих и уноса в струе. С этой целью И. К. Неймарк использовал основные положения теории свободной струи Абрамовича [6], присоединив к ним дополнительное условие—выделение тепла за счет горения. Однако воспользоваться выведенными И. К. Неймарком уравнениями для анализа явлений в горящем газовом факеле не представляется возможности, так как в уравнения входит мало определенная величина  $x_m$  — путь, на котором происходит горение; при-

Числа Ar	0,00812		0,00518		0,00396		0,00194		0,00072	
Координ.	y <sup>2</sup>	x <sup>2</sup>								
По Гр-Грж.	1,04	9,8	1,63	1,54	2,14	2,03	4,3	41,2	11,7	110
По Шепел.	0,84	6,6	1,13	8,8	1,54	10,5	2,16	16,4	4,0	32,8
По Глумк.	1,06	5,2	1,36	6,6	1,65	7,7	2,29	11,1	3,42	18,7



Фиг. 2. Искривление оси неизотермического факела (по формулам различных авторов).

менение же упрощенной формулы, в которой эта величина отсутствует, как указывает редакция журнала „Советское котлотурбостроение“ [13] дает весьма существенные ошибки. Кроме того, как видно из расчетных, но опытом не проверенных данных, приводимых Неймарком в табл. 2, величина поправки на изменение ординаты траектории струи за счет догорания 20% летучих составляет всего лишь около 4%.

Г. Н. Абрамович в уже цитированном труде [10] в отдельном параграфе „Некоторые характеристики горящего факела“ рассматривает вопрос о длине горящего факела. Для расчета длины горящего факела Г. И. Абрамович выводит уравнение

$$\left( \frac{ax}{R_0} \right)_{max} = 0,7 \frac{K_0}{K_{кр}} \quad (21)$$

Здесь  $K_0$  — начальная концентрация горючего в смеси, равная отношению веса горючего к весу воздуха в смеси;

$K_{кр}$  — конечная концентрация горючего в смеси, равная отношению веса горючего к весу воздуха для стехиометрической смеси. По нашему мнению, уравнение Абрамовича неприменимо для действительного процесса горения, так как в уравнении отсутствует основная физико-химическая величина, характеризующая процесс горения—скорость распространения пламени, зависящая от природы горючего и состава горючей смеси. По уравнению Абрамовича длина факела будет одной и той же как для горения  $H_2$ ,

так и для горения  $\text{CO}$ , так как  $K_{кр}$  в обоих случаях одинакова; между тем общеизвестно, что при одинаковых условиях длина горящего факела  $\text{H}_2$  значительно короче длины горящего факела  $\text{CO}$ , вследствие большей скорости распространения пламени в горючих смесях, содержащих  $\text{H}_2$ .

Это уравнение Г. Н. Абрамовича совершенно неприменимо для характеристики горящего газового факела вообще; в самом деле, когда в горящем факеле отсутствует первичный воздух и весь необходимый для горения воздух притекает к факелу из окружающей среды, для решения уравнения (21) пришлось бы принять  $K_0$  равным бесконечно большой величине, и тогда

$$\frac{x}{R_0} = \infty$$

Когда же горит полностью подготовленная газовая смесь, пришлось бы принять  $K_0 = K_{кр}$ ; в этом случае, независимо от природы горючего, получается факел всегда одинаковой длины, равный

$$\frac{x}{R_0} = \frac{0,7}{a}$$

Попытка применить уравнение (21) для исследования горения частично подготовленных горючих смесей также не приводит к результатам, совпадающим с опытными данными. Например, для частично подготовленной горючей смеси водяной газ-воздух при количестве первичного воздуха в смеси  $\alpha = 0,3$  следует подставить в уравнение Г. Н. Абрамовича:  $K_0 = 0,72$  и  $K_{кр} = 0,216$ , и тогда

$$\frac{x}{R_0} = 0,7 \frac{0,72}{0,216 a} = \frac{2,24}{a}$$

Для трубчатой горелки коэффициент структуры струи  $a = 0,076$ , и тогда

$$\frac{x}{R_0} = \frac{2,24}{0,076} = 29,4,$$

т. е. получается, что вне зависимости от начальной скорости истечения длина факела будет всегда одной и той же. Между тем, как видно из таблицы наших опытов, относительная длина факела изменяется от  $\frac{l}{d} = 21,7$

при скорости истечения  $5,26 \frac{м}{сек}$  до  $\frac{l}{d} = 49$  для скорости истечения

в  $11,85 \frac{м}{сек}$ .

Затем Г. Н. Абрамович, считая, что при стехиометрических соотношениях между количеством горючего и воздуха, необходимого для горения в факеле, не обеспечивается полной равномерности перемешивания, устанавливает, на основании закона формирования струи, зависимость между длиной пути перемешивания и количеством воздуха, вовлеченного в факел к концу процесса горения. Из этой зависимости вытекает, что полное перемешивание горючего с воздухом произойдет во всех случаях тогда, когда коэффициент избытка воздуха будет равняться  $\alpha = 1,52$ .

Такое обобщение является явно несостоятельным и противоречащим общеизвестным фактам.

Г. Я. Вьюгова [14] выполнила обширное экспериментальное исследование вертикального свободно горящего факела газозвушной смеси горючего газа теплотворной способностью  $4500 \frac{\text{ккал}}{\text{м}^3}$ ; ею исследова-

ны распределение полей температур и скоростей в 3 зонах горящего факела и установлены обобщенные зависимости изменения относительной скорости и относительной температуры по длине факела. Исследованиями не затронуты вопросы: а) положение вершины конуса горения в зависимости от скорости истечения и состава горючих смесей, т. е. не исследован вопрос о длине пламени горящего факела; б) так как в опытах факел был вертикальным, то естественно, вопросы влияния искривления оси факела на длину пламени совершенно не затронуты; в) практический пример, приводимый Г. Я. Вьюговой, иллюстрирующий применение найденных ею соотношений, касается третьей зоны факела—зоны охлаждения продуктов горения на большом расстоянии от вершины конуса горения—расчетный участок расположен на расстоянии 242 мм при высоте вершины конуса горения равной 80 мм; в этой области, несомненно, применимы соотношения, установленные для горячей (но не горячей) струи.

Таким образом, подводя итоги литературных данных о состоянии вопроса неизотермического истечения горящего факела, необходимо прийти к заключению, что в настоящее время без постановки специального экспериментального исследования этот вопрос удовлетворительно не может быть решен. В связи с этим автором и предпринято опытное исследование дальнотойности горящего факела, изменяющейся под влиянием искривления оси потока и настильности.

## II.

Методика, применявшаяся для исследования влияния искривления оси и настильности горящего газового факела на его дальнотойность, была очень простой: струя газа или горючей смеси (газ и первичный воздух) выпускалась из трубки в атмосферу под различными углами наклона и поджигалась; в образовавшемся пламени измерялась температура, длина, и очерчивались контуры факела по изображению его на экране, при этом измерялся расход газа и первичного воздуха при помощи газометров постоянного давления. Для изучения явления настильности струя горящего газа направлялась по поверхности гладкой металлической пластинки и очерчивались контуры горящего факела.

Полученные при исследовании данные носят качественный характер; однако, несмотря на это, можно приближенно судить о степени влияния искривления оси и настильности факела на дальнотойность его и установить приближенные количественные зависимости.

В опытах с водяным газом применялась трубчатая горелка диаметром 2,32 мм, скорость истечения изменялась в пределах от  $w_0 = 3,5 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$  до

$w_0 = 11,85 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$ ; количество первичного воздуха в горючей смеси изменялось от  $\alpha = 0$  до  $\alpha = 0,31$ .

Состав водяного газа, применявшийся для исследования:

$\text{CO}_2$  — 4,2%,  $\text{CO}$  — 29,4%;  $\text{H}_2$  — 52,3%;  $\text{CH}_4$  — 6,4%;  $\text{O}_2$  — 0,2%;  $\text{N}_2$  — 7,5%

Для полного горения этого газа теоретически необходимое количество воздуха равно  $2,55 \frac{\text{м}^3}{\text{м}^3}$ . Результаты измерений представлены в таблице 1.

Результаты исследования влияния искривления оси и настильности

№ п.п.	Расход литр сек.			Скорость истече- ния м сек W <sub>0</sub>	Доля перв. возд. α	Число Ag	Направление факела
	газ	воздух	смесь				
1	2	3	4	5	6	7	8
Факел без первич-							
1	0,01475	—	—	3,50	—	0,00731	Вертик.
2	"	—	—	"	—	"	Горизон.
3	"	—	—	"	—	"	Вниз 10°
4	"	—	—	"	—	"	Наклон. 20°
5	"	—	—	"	—	"	Наклон. 30°
6	0,0222	—	—	5,26	—	0,00324	Вертик.
7	"	—	—	"	—	"	Горизон.
8	"	—	—	"	—	"	Наклон. 10°
9	"	—	—	"	—	"	Наклон. 20°
10	"	—	—	"	—	"	Наклон. 30°
11	0,0285	—	—	6,75	—	0,00197	Вертик.
12	"	—	—	"	—	"	Горизон.
13	"	—	—	"	—	"	Наклон. 10°
14	"	—	—	"	—	"	Наклон. 20°
15	"	—	—	"	—	"	Наклон. 30°
16	0,0335	—	—	7,94	—	0,00142	Вертик.
17	"	—	—	"	—	"	Горизон.
18	"	—	—	"	—	"	Наклон. 10°
19	"	—	—	"	—	"	Наклон. 20°
20	"	—	—	"	—	"	Наклон. 30°
21	0,0392	—	—	9,31	—	0,00103	Вертик.
22	"	—	—	"	—	"	Горизон.
23	"	—	—	"	—	"	Наклон. 10°
24	"	—	—	"	—	"	Наклон. 20°
25	"	—	—	"	—	"	Наклон. 30°
Факел с первич-							
26	0,0125	0,0098	0,0223	5,26	0,31	0,00324	Вертик.
27	"	"	"	"	"	"	Горизон.
28	"	"	"	"	"	"	Наклон. 10°
29	"	"	"	"	"	"	Наклон. 20°
30	"	"	"	"	"	"	Наклон. 30°
31	0,0760	0,0124	0,0284	6,75	0,31	0,00197	Вертик.
32	"	"	"	"	"	"	Горизон.
33	"	"	"	"	"	"	Наклон. 10°
34	"	"	"	"	"	"	Наклон. 20°
35	"	"	"	"	"	"	Наклон. 30°
36	0,188	0,0147	0,00335	7,94	0,31	0,00142	Вертик.
37	"	"	"	"	"	"	Горизон.
38	"	"	"	"	"	"	Наклон. 10°
39	"	"	"	"	"	"	Вниз 20°
40	"	"	"	"	"	"	Вниз 30°
41	0,0221	0,0172	0,0393	9,31	0,31	0,00103	Вертик.
42	"	"	"	"	"	"	Горизон.
43	"	"	"	"	"	"	Вниз 10°
44	"	"	"	"	"	"	Вниз 20°
45	"	"	"	"	"	"	Вниз 30°
46	0,0282	0,0219	0,0501	11,85	0,31	0,000638	Вертик.
47	"	"	"	"	"	"	Горизон.
48	"	"	"	"	"	"	Вниз 10°
49	"	"	"	"	"	"	Вниз 20°
50	"	"	"	"	"	"	Вниз 30°

Таблица

горящего газового факела на его дальность

Свободный факел					Настильный факел					Рассчитано	
$\frac{l}{d_0}$	$\frac{x}{d_0}$	$\left(\frac{x}{d_0}\right)^a$	$\frac{y}{d_0}$	$\left(\frac{y}{d_0}\right)^a$	$\frac{l}{d_0}$	$\frac{x}{d_0}$	$\left(\frac{x}{d_0}\right)^a$	$\frac{y}{d_0}$	$\left(\frac{y}{d_0}\right)^a$	$\left(\frac{x}{d_0}\right)^a$	$\left(\frac{v}{d_0}\right)^a$
9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
ного воздуха											
25,0	—	—	—	—	35,8	—	—	—	—	—	—
21,1	13,6	—	13,4	—	27,1	14,3	—	19	—	—	—
19,0	12,5	—	5,6	—	25,5	15,5	—	16,8	—	11,2	1,2
18,0	13,4	—	4,7	—	28,5	12,9	—	15,1	—	15,7	3,4
17,0	13,4	6,5	3,9	-1,16	27,0	18,2	6,5	14,7	0,6	19,9	6,9
40,0	—	—	—	—	56,0	—	—	—	—	—	—
30,6	27,0	—	10,0	—	41,0	35,4	—	32,8	—	—	—
31,4	28,5	—	10,3	—	47,0	39,3	—	28,9	—	19,2	1,2
29,0	29,0	15,7	2,6	-1,8	45,0	35,8	15,5	17,3	-1,7	28,7	6,3
28,5	26,4	14,2	3,0	-2,6	41,0	34,6	14,2	17,8	-3,0	34,2	11,9
51,7	—	—	—	—	73,3	—	—	—	—	—	—
37,1	32,6	—	12,9	—	56,0	42,3	—	33,6	—	—	—
36,6	34,1	—	10,3	—	57,2	43,1	—	28,1	—	26,8	2,9
36,5	32,8	14,7	3,24	-16	55,2	45,8	14,7	18,2	-0,9	40,1	8,8
35,0	33,2	19,4	1,94	-3,5	53,0	40,0	19,6	17,8	-2,6	47,7	16,5
62,4	—	—	—	—	82,0	—	—	—	—	—	—
45,7	41,0	—	16,4	—	65,5	47,5	—	35,8	—	—	—
46,1	43,0	—	12,5	—	68,5	56,5	—	31,1	—	33,4	3,5
43,0	40,5	21,6	1,1	-2,6	66,0	54,8	22,9	20,3	-3,9	50,0	10,9
43,0	40,5	31,5	4,8	-5,6	62	52,2	31,5	3,9	-9,1	59,4	20,6
66,8	—	—	—	—	96,3	—	—	—	—	—	—
53,4	51,3	—	18,6	—	75,0	55,2	—	34,9	—	—	—
53,9	50,5	13,8	12,5	-1,0	78,4	66,4	15,5	31,5	-1,3	41,4	4,4
51,3	48,0	29,4	1,7	-3,3	76,0	65,2	29,4	16,0	3,9	61,9	13,5
50,0	49,0	28,9	0,9	-5,2	73,5	56,1	19,8	21,6	-3,2	73,5	25,4
НЫМ ВОЗДУХОМ											
21,7	—	—	—	—	30,0	—	—	—	—	—	—
18,0	15,1	—	3,9	—	25,7	18,5	—	7,7	—	—	—
30,2	20,0	—	3,5	—	23,3	21,9	—	7,7	—	—	—
1,5	12,3	6,5	0,2	-0,4	17,2	16,8	6,9	2,1	-0,2	—	—
12,1	11,6	11,6	-2,9	-2,9	15,1	14,7	14,7	-1,9	-1,9	—	—
27,5	—	—	—	—	37,5	—	—	—	—	—	—
23,0	20,0	—	4,9	—	33,0	31,0	—	10,6	—	—	—
26,3	25,0	—	3,9	—	33,4	31,4	—	8,2	—	—	—
23,7	20,0	15,1	-1,0	-1,5	29,3	28,0	12,1	1,3	-1,1	—	—
21,6	21,0	21,0	-5,4	-5,43	31,1	30,6	21,5	-2,1	-3,9	—	—
31,7	—	—	—	—	45,0	—	—	—	—	—	—
27,0	26,0	—	5,6	—	38,5	37,5	—	11,6	—	—	—
30,2	30,0	—	3,5	—	37,2	36,0	—	6,9	—	—	—
29,7	28,5	21,5	-3,3	-3,5	38,8	37,9	21,9	-1,1	-3,8	—	—
27,6	26,5	26,5	-7,1	-7,1	38,4	37,1	25,8	-4,3	-6,5	—	—
38,8	—	—	—	—	53,8	—	—	—	—	—	—
31,5	30,0	—	4,1	—	45,0	4,0	—	10,7	—	—	—
37,9	37,9	17,2	0,2	-1,7	49,6	49,0	18,6	5,1	-1,7	—	—
37,5	37,1	29,3	-4,7	-4,7	51,3	50,4	32,3	-2,6	-5,1	—	—
34,9	33,4	31,5	-7,3	-8,2	48,8	47,8	33,6	-7,3	-8,6	—	—
40,0	—	—	—	—	70,7	—	—	—	—	—	—
40,0	40,0	—	3,5	—	57,2	55,0	—	9,2	—	—	—
43,1	43,0	21,5	-1,7	-2,6	60,8	60,2	24,1	4,3	-2,8	57,0	6,1
41,8	41,0	36,6	-5,2	-5,4	57,2	57,0	39,7	-3,9	-15,1	85,2	18,6
40,5	39,2	37,9	—	-1,1	57,2	56,0	41	-9,0	-10,0	101,0	35,0

В таблице следующие обозначения:

$\frac{l}{d_0}$  — полная относительная длина видимого горящего факела, измеренная по искривленной оси (траектория оси);

$\frac{x}{d_0}$  — проекция траекторий оси горящего факела на ось абсцисс;

$\frac{y}{d_0}$  — то же на ось ординат;

$\left(\frac{x}{d_0}\right)^2$  — длина горизонтальной проекции от начала до вершины горящего факела;

$\left(\frac{y}{d_0}\right)^2$  — длина вертикальной проекции от начала до вершины горящего факела; знак +, когда вершина выше оси абсцисс, знак —, когда вершина факела ниже оси абсцисс.

„Рассчитано“:  $\left(\frac{x}{d_0}\right)^2, \left(\frac{y}{d_0}\right)^2$  — координаты вершины факела, рассчитанные по формулам Шепелева (40 и 41).

• Критерий Архимеда рассчитывался по формуле:

$$Ar = \frac{g \Delta T d}{T w_0^2},$$

$$g = 9,81 \frac{м}{сек^2};$$

$\Delta T$  — по температуре пламени (переменной) и температуре окружающей среды (постоянной);

$d_0$  — диаметр отверстия горелки, равный 0,00232 м.

$w_0$  — начальная расходная скорость истечения.

Проводились также опыты над горящим газовым факелом светильного газа; для этой цели применялись 3 и 7-щелевые газовые горелки; так как исследования горящего факела светильного газа проводились в условиях, близких к диффузионному методу сжигания газа, то результаты опытов описаны в специальной работе, посвященной исследованию горящего ламинарно-диффузионного газового факела [15].

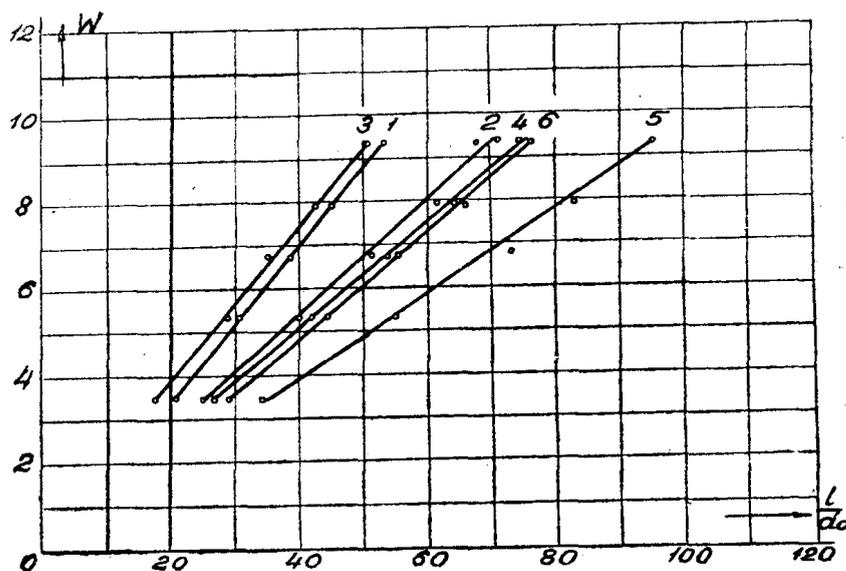
Графически зависимость между длиной свободного и настильного факелов без первичного воздуха и скоростью истечения газа из горелки представлена на фиг. 3 в виде шести прямых: три прямые для свободного факела и три прямые для настильного факела. Экспериментальные точки довольно близко располагаются около прямых. Как для свободного, так и для настильного факелов при одинаковых скоростях истечения вертикальные факелы имеют наибольшую длину, наклонные (искривленные) факелы имеют наименьшую длину. Отношение длин вертикального и искривленного факелов составляет: для свободного факела — от 1,20 до 1,48 и для настильного факела — от 1,20 до 1,38, причем от изменения скорости истечения величина отношения не изменяется.

При горизонтальном и наклонных направлениях осей факелов последние искривляются; искривленные оси факелов приближаются к параболическим кривым. Однако длины искривленных осей факелов, направленных

наклонно, очень мало отличаются от искривленной длины горизонтального факела, так как экспериментальные точки для горизонтального и наклонного факелов близко взаимно располагаются и в некоторых случаях совпадают. Это обстоятельство указывает на более или менее одинаковые условия смешения окружающего воздуха с газом в горящем факеле, вне зависимости от угла наклона оси факела (исключая вертикальное направление).

Для объяснения вышеуказанных явлений можно предложить следующую схему.

При вертикальном направлении свободного факела без первичного воздуха условия для притока воздуха из окружающей среды к фронту пламени являются наименее благоприятными, так как вокруг фронта пламени находится слой продуктов горения, который и препятствует диффу-



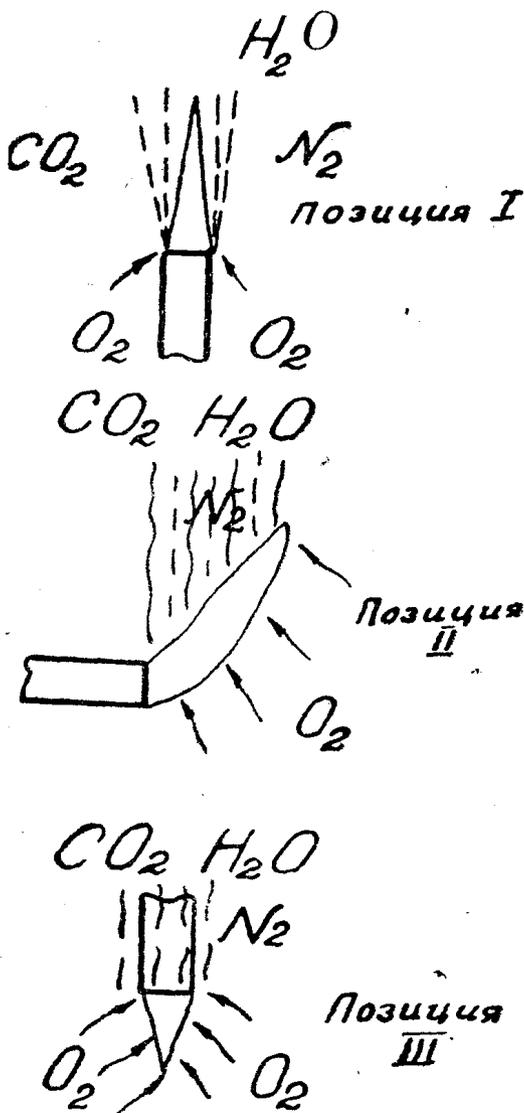
Фиг. . Длина свободного и настильного горящего газового факела при горении без первичного воздуха:

- 1 — свободный горизонтальный факел; 2 — свободный вертикальный факел; 3 — свободный факел под углом  $20^\circ$ ; 4 — настильный горизонтальный факел; 5 — настильный вертикальный факел; 6 — настильный факел под углом  $20^\circ$ .

зии кислорода из воздуха; приток кислорода к фронту пламени наиболее доступен к устью горелки. Вследствие разницы в аэростатических давлениях у устья горелки между продуктами горения и наружным воздухом, последний как бы „смывает“ с поверхности фронта пламени продукты горения по высоте факела. (Схема притока воздуха к вертикальному факелу изображена на фиг. 4, позиция 1).

При горизонтальном направлении факела в силу разницы в аэростатических давлениях воздух притекает к поверхности фронта горящего факела по всей длине его; следовательно, условия доступа воздуха более благоприятны, чем при вертикальном расположении, поэтому горизонтально направленный факел является более коротким, чем вертикальный. При небольшом угле наклона оси факела условия доступа воздуха к фронту пламени остаются более или менее сходными, как и в случае горизонтального направления, поэтому длина факела укорачивается мало. Но при увеличении угла наклона оси факела увеличивается доступная поверхность и в пределе, когда угол наклона равен  $90^\circ$ , т. е. когда факел

будет направлен вертикально вниз, тогда приток воздуха будет ко всей поверхности горящего факела, вследствие чего факел будет наиболее коротким, что и подтверждается опытом (схема притока воздуха изображена на фиг. 4, позиция 3). Настильный факел всегда длиннее свободного



Фиг. 4. Схема притока воздуха к горящему факелу.

(при одинаковых скоростях истечения). При отсутствии горения удлинение настильного факела обычно объясняется тем, что уменьшается сопротивление движению потока, стелющегося по поверхности, по сравнению с сопротивлением окружающей неподвижной газовой среды. Из теории постоянства количества движения применительно к условиям смешения газов, когда

$$m\omega_0 = \text{const}, \quad (23)$$

следует, что благодаря меньшему вовлечению окружающей среды в основной поток при настильном движении начальная скорость  $\omega_0$  затухает менее интенсивно, сохраняется на большем расстоянии, поэтому и увеличивается дальность факела. На удлинение горящего настильного факела, по сравнению с горящим свободным, оказывает влияние затруднительный доступ воздуха, необходимого для горения, путем диффузии из окружающей среды.

В наших опытах относительное удлинение настильного факела по сравнению со свободным составляет от 32 до 41%—в среднем 37%, причем отношение длины настильного факела к длине свободного факела остается приблизительно постоянным и не зависит таким образом от увеличения скорости истечения; так, при увеличении скорости истечения от 3,50 м/сек до 9,3 м/сек, т. е. в 2,8 раза, отношение длины настильного факела к длине свободного составляет: при минимальной (в опытах) скорости истечения

$$\frac{l_n}{l_c} = 1,38 \text{ и при максимальной (в опытах) скорости истечения } \frac{l_n}{l_c} = 1,35$$

(для вертикального горящего факела без первичного воздуха, т. е. опыты с 1 по 25). Если в качестве исходной величины взять длину горизонтального или немного наклонного факела (угол наклона не более  $20^\circ$ ) и сравнить с нею длины вертикального свободного и настильного факелов соответственно, то последние увеличиваются вследствие влияния условий, затрудняющих доступ (диффузия, смещение) воздуха из окружающей среды к фронту пламени. Для приблизительной количественной оценки этого влияния введем понятие о кажущейся (условной) скорости распространения пламени. Если действительная, нормальная (по Михельсону) ско-

рость распространения пламени зависит от состава горючих смесей (ранее подготовленных), то вводимая нами кажущаяся, условная скорость распространения пламени зависит от условий доступа воздуха к фронту пламени (диффузия, смешение). Поэтому кажущуюся скорость распространения пламени можно представить как произведение нормальной на некоторый коэффициент, характеризующий влияние условий доступа воздуха, т. е.

$$U_k = KU \quad (24)$$

при этом  $U$ —есть кинетический фактор (нормальная скорость),

$K$ —диффузионный фактор.

Во всех рассматриваемых случаях горения без первичного воздуха кинетический фактор  $U$  может быть принят одинаковым, диффузионный же фактор  $K$  является переменной величиной.

Из определения скорости распространения пламени по Михельсону [16] следует, приближенно, что

$$l = r_0 \frac{\omega_0}{U_k} = r_0 \frac{\omega_0}{KU}$$

или

$$\frac{l}{d_0} = 0,5 \frac{\omega_0}{KU} \quad (25)$$

Если произведение  $KU$  не зависит от скорости истечения (в пределах выполненных опытов), то графически в координатах  $\frac{l}{d_0}$  и  $\omega_0$  получим прямую линию, тангенс угла наклона которой будет равен  $\frac{0,5}{KU}$ . Для горизонтального или слабо наклонных свободных факелов по фиг. 3 получаем

$$\frac{0,5}{K_1 U} = 5,77, \text{ откуда } K_1 U = 0,0870;$$

для вертикального свободного факела  $K_2 U = \frac{0,5}{7,90} = 0,0667$ ; для горизонтального

настильного факела  $K_3 U = \frac{0,5}{8,15} = 0,0615$ ; для вертикального

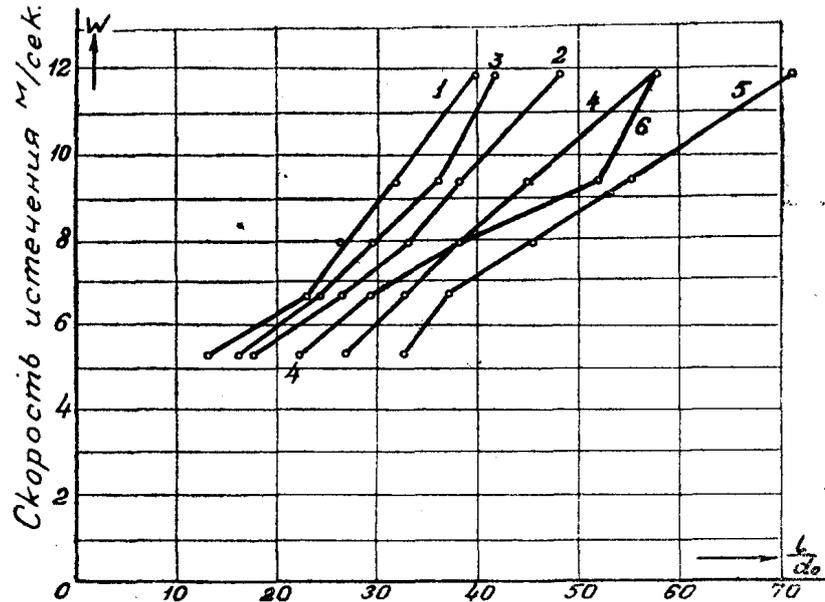
настильного факела  $K_4 U = \frac{0,5}{10,4} = 0,048$ . Относительное значение величины диффузионного фактора изменяется в следующем порядке:

если для горизонтального свободного факела  $K_1 = 1$ ,  
 то для вертикального " "  $K_2 = 0,76$   
 для горизонтального настильного " "  $K_3 = 0,70$   
 для вертикального " "  $K_4 = 0,55$ .

Соответственно этому изменяется и длина факела.

Следовательно  $\left(\frac{l}{d_0}\right)$  вертикального свободного факела = 1,31  $\left(\frac{l}{d_0}\right)$  горизонтального свободного факела;  $\left(\frac{l}{d_0}\right)$  горизонтального настильного факела = 1,43  $\left(\frac{l}{d_0}\right)$  горизонтального свободного факела;  $\left(\frac{l}{d_0}\right)$  вертикального настильного факела = 1,81  $\left(\frac{l}{d_0}\right)$  горизонтального свободного факела.

На фиг. 5 графически изображены зависимости между длиной факела пламени  $\frac{l}{d_0}$  и начальной скоростью истечения для горючей смеси, содержащей первичный воздух в количестве, соответствующем  $\alpha=0,31$  при вертикальном, горизонтальном и наклонном направлениях. В сходных условиях организации факела длина его для горючих смесей при  $\alpha=0,31$



Фиг. 5. Длина свободного и настильного горящего газового факела при горении с первичным воздухом:

- 1 — свободный горизонтальный факел; 2 — свободный вертикальный факел; 3 — свободный факел под углом  $20^\circ$ ; 4 — настильный горизонтальный факел; 5 — настильный вертикальный факел; 6 — настильный факел под углом  $20^\circ$ .

значительно короче, чем для факела без первичного воздуха. Экспериментальные точки довольно близко располагаются к прямым, уравнения которых имеют общий вид

$$\frac{l}{d_0} = c w_0, \quad (26)$$

где по предыдущему величина  $c = \frac{0,5}{K_n U_n}$ ; при этом

для горизонтального свободного факела  $c = 3,40$ ;  $K_n U_n = 0,147$

для вертикального свободного факела  $c = 4,10$ ;  $K_n U_n = 0,122$

для горизонтального настильного  $c = 4,87$ ;  $K_n U_n = 0,102$

для вертикального настильного  $c = 5,70$ ;  $K_n U_n = 0,0875$ .

Для сходственных условий организации факела диффузионный фактор  $K_n$  можно принять одинаковым как для факела без первичного воздуха, так и для факела с первичным воздухом, кинетический же фактор  $U_n$  будет различным. Отношение кинетических факторов  $\frac{U_n}{U}$  дает представ-

ление об увеличении скорости распространения пламени в условиях факела с первичным воздухом по сравнению с факелом без первичного воздуха.

Для горизонтального свободного факела  $\frac{U_n}{U} = 1,69$

для вертикального " "  $\frac{U_n}{U} = 1,83$

для горизонтального настильного " "  $\frac{U_n}{U} = 1,67$

для вертикального " "  $\frac{U_n}{U} = 1,82$

Таким образом, для всех четырех условий организации факела с первичным воздухом в количестве, соответствующем  $\alpha = 0,31$ , кинетический фактор (условная скорость распространения пламени) приблизительно в 1,80 раза больше, чем для факела без первичного воздуха.

При истечении горящего наклонного факела происходит искривление оси его под влиянием подъемной силы, обусловленной разностью плотностей газов в факеле и в окружающей среде. Уравнения для определения координат вершины параболической траектории факела, установленные и проверенные в условиях неизотермического негорящего факела, например уравнения (16) и (17) по Шепелеву не пригодны для характеристики горящего факела. Горящий газовый факел имеет неоднородную тепловую и химическую структуру: ядро факела (без первичного воздуха), состоящее из невоспламенившегося газа, имеет низкую температуру, ниже температуры воспламенения, оболочка факела—поверхность горения имеет высокую температуру. При наличии в горючей смеси первичного воздуха, температура поверхности внутреннего конуса отличается от температуры поверхности внешнего конуса горения и др. Поэтому однозначная характеристика горящего факела по критерию Архимеда явно недостаточна, вследствие чего опытные данные по определению координат вершины изогнутой (параболической) траектории горящего факела резко расходятся с расчетными по уравнению (16) и (17). (Сравните координаты вершины  $\left(\frac{x}{d_0}\right)^6$  и  $\left(\frac{y}{d_0}\right)^6$  в графе „рассчитано“ с измерениями  $\left(\frac{x}{d_0}\right)^6$  и  $\left(\frac{y}{d_0}\right)^6$  в графах для свободного и настильного факелов).

Причину этих расхождений можно выявить следующим образом: рассмотрим изотермический наклонный факел, для которого  $\Delta T = 0$  и  $Ar = 0$ , факел прямолинейный, траектория его оси описывается уравнением

$$\frac{y}{x} = \operatorname{tg} \alpha \quad (27)$$

Для неизотермического, но негорящего наклонного факела  $\Delta T > 0$  и  $Ar > 0$ ; факел искривленный; для вершины прямолинейной траектории из уравнений Шепелева (16) и (17) получаем

$$\left(\frac{y}{x}\right)^6 = 0,6 \operatorname{tg} \alpha \quad (28)$$

Здесь коэффициент 0,6 есть мера отклонения оси факела в вершине его от первоначального направления, вследствие влияния подъемной силы.

Для неизотермического горящего факела, по нашим опытным данным, положение вершины криволинейной траектории характеризуется уравнением

$$\left(\frac{y}{x}\right)^6 = m \operatorname{tg} \alpha, \quad (29)$$

где  $m$ —мера отклонения оси горящего факела в вершине его от первоначального направления вследствие влияния подъемной силы и химиче-

ской и тепловой неоднородности факела, причем величина  $m$  не остается постоянной, а зависит, главным образом, от содержания первичного воздуха в горючей смеси, для факела без первичного воздуха величина  $m$  приблизительно равна 0,3; для факела с количеством первичного воздуха 0,3 от теоретически необходимого величина  $m$  приблизительно равна 0,45. Можно полагать, что чем больше первичного воздуха в горючей смеси, тем однороднее в тепловом отношении факел и тем больше степень приближения относительных значений координат вершины оси горящего факела к относительным значениям координат вершины неизотермического негорящего факела. Но абсолютные значения координат вершины оси горящего факела не будут совпадать с таковыми же для вершины негорящего неизотермического факела; последние имеют гораздо большее значение, чем первые, что видно из сравнения  $x_в$  и  $y_в$  в графе „рассчитано“ и  $x_в$  и  $y_в$  по измерениям. Это обстоятельство указывает на то, что траектория оси горящего факела не определяется однозначно величиной критерия  $Ar$ , но на траекторию влияет также скорость распространения пламени, т. е. природа горючего и состав горючих смесей. Детально этот вопрос нами не исследован.

Попытки практического применения явлений газового фонтана (без учета влияния настильности пламени) к ванным стеклоплавильным печам предприняты нами еще в 1936 году в работе [17], где графически наглядно показано соотношение между шириной пламенного пролета, скоростью истечения и углом наклона горелки. Экспериментальный материал, изложенный в настоящей работе, значительно расширяет и уточняет ранние представления о динамике пламенного потока.

#### Краткие выводы

1. Экспериментально исследовано влияние искривления оси и настильности горящего газового факела на его дальность при различных начальных скоростях истечения, различных углах наклона оси факела и для различных составов горючих смесей.

2. Показано, что действительная траектория оси горящего свободного и настильного факелов не может удовлетворительно описываться уравнениями с однозначной зависимостью только от критерия подъемной силы (критерия Архимеда).

3. Сделана попытка к объяснению укорачивания дальности горизонтального и наклонного факелов пламени по сравнению с вертикальным с точки зрения влияния кинетических и диффузионных факторов на смещение горючего с воздухом и на процесс горения.

4. Выявлены и обобщены зависимости между дальностью настильного и свободного факелов. Удлинение настильного факела по сравнению со свободным объясняется влиянием диффузионного фактора, уменьшающего интенсивность перемешивания горючего с воздухом.

5. Укорачивание свободного и настильного факелов пламени в горючей смеси, содержащей первичный воздух по сравнению с факелом, образующимся при истечении одного лишь газа, объяснено влиянием кинетических факторов (увеличением скорости распространения пламени).

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. В. Е. Грум-Гржимайло. Пламенные печи, ч. 1, 1925.
2. Г. П. Иванов. Вопросы движения газов в печах, 1936.
3. М. А. Глинков. Сталь 5-6, 1943.
4. И. Г. Есьман. ЖРМО, 6, 1910, а также [1].
5. В. Слесарев. ЖРМО, 1, 1913.
6. Г. Н. Абрамович. Труды ЦАГИ, вып. 293, 1936.
7. И. А. Шеледев. Отопление и вентиляция, 7, 1940.

8. Д. Н. Ляховский и С. Н. Сыркин. Советское котлотурбостроение, 2, 1938.
  9. Д. Н. Ляховский и С. Н. Сыркин. ЖТФ, 9, 1939.
  10. Г. Н. Абрамович. Турбулентные свободные струи жидкостей и газов, 1948.
  11. И. А. Шепелев. Отопление и вентиляция, 7, 1940.
  12. Под редакцией В. А. Туркуса. Современные вопросы отопления и вентиляции, 1949.
  13. И. К. Неймарк. Советское котлотурбостроение, 7, 1939.
  14. Цинитман. Нагрев стали и печи. Сборник статей, книга 9, 1949.
  15. Н. Н. Норкин. Известия Томского политехнического института, т. 70, 1950.
  16. В. А. Михельсон. Собрание сочинений, т. 1, 1930.
  17. Н. Н. Норкин. Керамика и стекло, 2, 1936.
-