

новлен порядок выгорания составных частей газа, распределение кислорода первичного воздуха между составными частями газа и влияние катализаторов.

3. Факел пламени водяного газа в частично подготовленных горючих смесях. Исследовано влияние состава горючих смесей, диаметра горелок и режима истечения на длину факела и на распределение температуры и теплонапряженности в факеле.

4. Диффузионное пламя водяного газа. Исследовано диффузионное горение водяного газа в плоскощелевых атмосферных горелках и в экранированной топочной камере, а также в промышленной ванной стекловаренной печи, построенной на одном заводе по проекту автора. Установлено влияние скорости истечения на длину диффузионного плоскощелевого факела при одинаковых и неодинаковых скоростях истечения газа и воздуха, распределение температуры по длине факела и теплоотдачи в закрытой топочной камере.

5. Поверхностное (беспламенное) горение водяного газа. Наряду с развитием общей идеи об условиях превращения факельного горения в беспламенное, вследствие деформации нормального конического фронта пламени под влиянием гидродинамических и термокинетических факторов, выполнено экспериментальное исследование условий образования и устойчивого развития беспламенного поверхностного горения водяного газа в зернистом слое и каналовой горелке.

Исследование выполнено в лаборатории тепловой аппаратуры Томского ордена Трудового Красного Знамени политехнического института. В разное время к выполнению работы привлекались научные и технические сотрудники лаборатории: Г. Д. Специ, А. А. Стариков, Н. Д. Вылегжанин, Т. Я. Ваганова.

II. Состав водяного газа

Топливом служит каменный уголь Араличевского месторождения (Кузбасс); уголь тощий, частично полуантрацитовый, не спекается.

Средний состав угля: $W_p = 9,0\%$; $A_c = 16,0\%$; $S_{\text{общ}} = 0,8\%$; $C_r = 88,1\%$; $H_r = 4,0\%$; $N_r = 1,7\%$; $O_r = 5,3\%$; содержание летучих в среднем $V_r = 12,0\%$.

Технологический режим газификации характеризуется следующими данными: период воздушного (горячего) дутья от 2 до 3 мин., период парового (холодного) дутья от 3 до 4 мин. Период парового дутья (газование) составляет в среднем 64% от времени полного цикла, и отношение времени газования ко времени воздушного дутья составляет в среднем 1,76. Уголь перед загрузкой просеивается через сито 25 мм; мелочь меньше 25 мм сжигается в топке парового котла, крупный уголь больше 25 мм загружается в газогенератор; загружаемый в газогенератор уголь по гранулометрическому составу неоднороден. Загрузка угля производится большими порциями весом, приблизительно, в 300—500 кг. Напряженность газификации в среднем 150 кг/м²час. Количество золы и шлака (выгреб) составляет в среднем 18% от загружаемого угля; газы воздушного дутья не используются, выбрасываются в атмосферу.

Водяной газ, получаемый в период парового дутья, имеет температуру при выходе из газогенератора около 900°C.

До ноября 1947 года в период парового дутья применялся насыщенный водяной пар давления 4 *ата*.

Средний состав водяного газа, получавшегося при взаимодействии насыщенного водяного пара, был следующий: CO —37,13%; CO_2 —4,87%; O_2 —0,19%; H_2 —52,30%; H_2O —2,30%; N_2 —3,21%. Теплотворная способность водяного газа указанного состава

$$Q_n^p = 2470 \text{ ккал/м}^3.$$

С ноября 1947 года стали применять для парового дутья перегретый водяной пар с давлением 4 *атм* и с температурой 325°C. В результате применения перегретого водяного пара значительно изменился состав и теплотворная способность водяного газа. В табл. 1 приведен состав водяного газа, получаемого при применении перегретого водяного пара.

Таблица 1

Состав и теплотворная способность водяного газа, получаемого при применении перегретого пара

Наименование		Среднее %	Минимум %	Максимум %
Химический состав су- хого водя- ного газа в % объемных	CO_2	4,8	3,8	6,4
	O_2	0,4	0,1	0,6
	CO	29,0	24,1	36,0
	H_2	52,2	42,2	57,5
	CH_4	6,2	2,5	8,6
	N_2	7,3	1,3	10,2
Теплотворная способность $\frac{\text{ккал}}{\text{м}^3}$		2760	2535	2930

Анализы газа производились с помощью газоанализатора ВТИ, снабженного платиновым капилляром для дожигания. Содержание CO_2 определялось поглощением щелочью, содержание кислорода O_2 —щелочным раствором пирогаллола, тяжелых углеводородов C_mH_n —бромной водой, окиси углерода CO —аммиачным раствором полухлористой меди и содержание метана CH_4 и водорода путем сжигания в капилляре с последующим поглощением CO_2 и O_2 .

Сравнивая состав водяного газа, получаемого при взаимодействии топлива с насыщенным водяным паром и с перегретым водяным паром того же давления, заключаем, что теплотворная способность водяного газа повышается при изменении перегретого пара от 2470 ккал/м³ до 2760 ккал/м³ (в среднем) за счет увеличения содержания метана CH_4 в газе.

Содержание влаги в водяном газе определялось пропусканием газа через 2 последовательно соединенные U-образные трубки, заполненные CaCl_2 . По увеличению веса этих трубок при пропускании через них определенного количества газа определяется содержание водяного пара. В среднем содержание водяного пара в газе равно 5,2 г/м³ или 6,92 г/кг, что приблизительно соответствует температуре насыщения водяного газа равной 45°C; в действительности же температура водяного газа не пре-

вышла 18—20°C, следовательно, влага в водяном газе находится как в виде пара, так и в виде тонко-дисперсного тумана.

Содержание сероводорода H_2S в водяном газе определялось методом осаждения уксусно-кислым кадмием; осадок сернистого кадмия титровался 0,1 N раствором иода с последующим оттитрованием избытка иода гипосульфитом в присутствии крахмала. Для этой цели использованы склянки Дрекслея, последовательно соединенные с газовыми часами. Обнаружено, что содержание сероводорода (в пересчете на серу) изменяется в значительных пределах, а именно: минимальное содержание серы $0,12 \text{ г/м}^3$, максимальное содержание серы $1,15 \text{ г/м}^3$ и наиболее часто встречающееся содержание серы $0,45 \text{ г/м}^3$. Следует заметить, что на заводе, производящем водяной газ, общей очистки газа от сероводорода не имеется, но в некоторых точках потребления устроены местные установки очистки газа от сероводорода с помощью болотной руды. При надлежащем уходе за установками местной очистки содержание сероводорода в очищенном газе понижалось до $0,08 \text{ г/м}^3$.

Содержание смолы в водяном газе определялось путем пропускания водяного газа через две последовательно соединенные U-образные стеклянные трубки, заполненные хлопчатобумажной ватой. Так как вместе со смолой вата поглощает также и водяные пары, находящиеся в газе, то после пропускания определенного количества газа (от 100 до 1000 литров) через поглотительные трубки последние нагревались в течение 1,5—2 часов в электрическом сушильном шкафу при температуре 105°C и затем взвешивались. Постоянство веса трубок после нагревания служило признаком удаления влаги из ваты. Содержание смолы в газе зависит от места отбора проб газа и режима газования. Так, в пробах, взятых непосредственно при выходе из газогенератора, содержание смолы изменяется от $0,1 \text{ г/м}^3$ до $0,56 \text{ г/м}^3$ в зависимости от времени газования. Минимальное содержание смолы соответствует периоду газования перед загрузкой свежей порции угля в газогенератор, когда в генераторе находится почти чистый кокс; максимальное содержание смолы соответствует периоду газования сразу же после загрузки свежей порции топлива, когда происходит наиболее интенсивное выделение летучих из топлива.

В пробах, взятых после очистки газа в скруббере, орошаемом водой, обнаружено содержание смолы от $0,05 \text{ г/м}^3$ до $0,19 \text{ г/м}^3$ в зависимости от времени газования. В пробах, взятых из газопровода химической лаборатории завода и в лаборатории института, т. е. после прохождения газа через довольно длинную и разветвленную сеть газопроводов, содержание смолы в водяном газе более или менее постоянное, не зависящее от времени газования, оно равно в среднем $0,04 \text{ г/м}^3$. Смола представляет собою очень вязкую массу темнубурого цвета. Удельный вес её, определенный пикнометром при 20°C, равен $1,24 \text{ г/см}^3$. Содержание свободного углерода в смоле в среднем 11,8%; содержание влаги в смоле около 30%. Фракционной перегонкой установлен следующий групповой состав смолы: первая фракция до 180°C составляет 36%, в том числе: вода 32,7%, легкое масло 3,3%; вторая фракция в интервале 230—300°C—тяжелое масло 2,6%; третья фракция в интервале 300—320°C—первая антраценовая фракция 3,7% и четвертая фракция в интервале 320—345°C—вторая антраценовая фракция—9,2% и, наконец, пек в количестве 48,5%. Значительный выход циклических соединений (антраценовая фракция) и большой остаток пека служат указанием на то, что смола является вторичной, высокотемпературной.

Несмотря на то, что количество смолы в водяном газе, поступающем в горелки, незначительное, в среднем $0,04 \text{ г/м}^3$, очистка водяного газа от смолы является актуально необходимой, так как атмосферные горелки с малым диаметром отверстий (около 1 мм и меньше) через короткое

время забиваются смолой, наблюдается явление „убегания“ огня, т. е. явление резкого сокращения длины пламени и, наконец, полного затухания газовой горелки. Однако очистка газа от смолы не производится, кроме предварительной скрубберной обработки водой горячего газа.

III. Структура пламени водяного газа

При сжигании частично подготовленных горючих смесей, содержащих воздух в количестве недостаточном для полного горения, образуется двухконусный факел пламени, два фронта горения. На поверхности внутреннего конуса сгорает такое количество газа, которое обеспечено наличием кислорода первичного воздуха, на поверхности внешнего конуса сгорает оставшая часть газа за счет диффузии кислорода из окружающей среды (рис. 1).

Высоты внутреннего и внешнего конусов горения зависят от первоначального состава горючей смеси, скорости и режима истечения и от диаметра отверстия горелки.

Целью нашего исследования являлось—выяснить влияние количества первичного воздуха на структуру пламени водяного газа, что имеет важ-

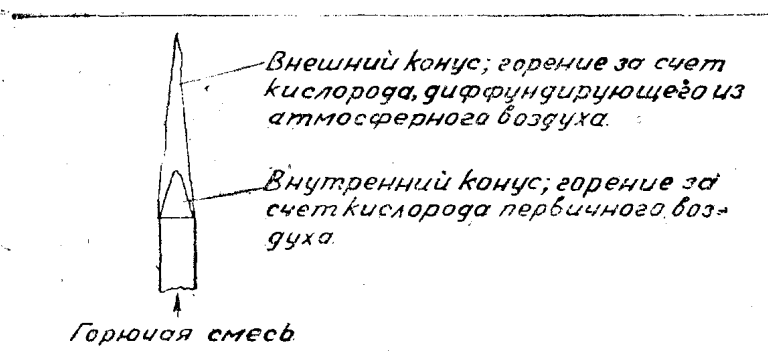


Рис. 1. Двухконусный факел пламени.

ное практическое значение при решении вопроса об организации факела пламени с помощью атмосферных горелок.

Исследование структуры пламени водяного газа производилось при разделении двухконусного пламени; химическим анализом определялся состав водяного газа, газозооной смеси, подаваемой в горелку, и межконусных газов. Были исследованы:

1. Пламя бунзеновской горелки с эжекцией первичного воздуха из окружающей атмосферы и с принудительной подачей газа и воздуха в горелку.

2. Пламя меккеровской горелки с платиновой сеткой.

3. Сжигание газо-воздушной смеси в фарфоровой и платиновой капиллярных трубках.

Метод исследования, описание опытной установки и полученные при исследовании материалы по каждой серии опытов опубликованы в специальной статье [3].

В настоящей статье приводятся обобщенные результаты и выводы, представленные в виде табл. 2 и на рис. 2.

Показателем относительной „горючести“ любого газа, например водорода, может служить величина отношения

$$\gamma = \frac{\text{относительное содержание водорода в горючей смеси}}{\text{относительное содержание водорода в продуктах горения}} = \frac{\beta_{г.см}}{\beta_{пр.гор}} \quad (1)$$

Результаты исследования структуры пламени водяного газа

Таблица 2

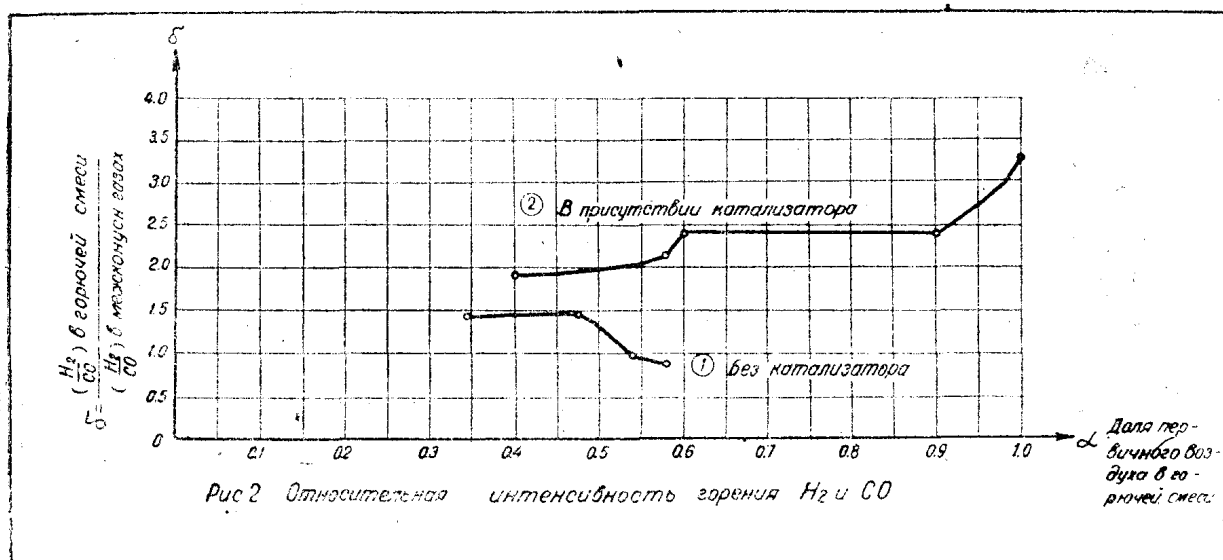
Условия сжигания водяного газа	Трубчатая горелка						Горелка с платиновой сеткой						Фарфоровая трубка	Платино- вая трубка				
	0,345		0,475		0,580		0,580		0,62		0,88				0,96		0,53	
Доля первичного воз- духа в горючей смеси																		
Химический состав в процентах объемн.	Горючая смесь	Продук. горения	Горючая смесь	Продук. горения	Горючая смесь	Продук. горения	Горючая смесь	Продук. горения	Горючая смесь	Продук. горения	Горючая смесь	Продук. горения	Горючая смесь	Продук. горения	Горючая смесь	Продук. горения	Горючая смесь	Продук. горения
	CO ₂	2,2	7,4	1,8	7,6	2,0	7,0	2,4	7,7	1,7	10,2	1,2	8,8	1,6	14	2,9	7,2	2,5
CO	18,8	19,2	14,0	16,6	12,5	10,9	11,5	19	11,4	10,2	8,4	14,8	7,7	1,5	16,2	14,1	12,9	17,35
H ₂	27,8	19,8	24,5	19,4	22,2	19,6	20	15,8	20,2	7,5	16	11,7	16,3	1	22,3	19,6	27,3	19,3
CH ₄	2,8	3,4	2,4	1,8	1,8	1,2	2,8	2,7	2,5	2,4	2,4	3,2	1,7	0,3	1,1	0,7	3,4	2,47
O ₂	10,0	—	11,4	—	12,1	—	12,7	—	12,8	—	14,6	—	14,8	—	11,5	—	10,6	—
N ₂	39,3	50,2	45,9	54,6	49,6	61,3	50,6	54,8	51,4	69,7	57,4	61,5	57,9	83,2	46,0	58,5	43,3	52,7
$\beta = \frac{H_2}{CO+CH_4}$	1,28	0,88	1,49	1,05	1,53	1,62	1,40	0,73	1,46	0,59	1,47	0,65	1,8	0,55	1,2	1,34	1,66	0,98
$\gamma = \frac{\beta_{г. см.}}{\beta_{пр. гор.}}$	1,45		1,42		0,95		1,91		2,48		2,28		3,28		0,90		1,70	
Распределение кисло- рода при горении в процентах															Для CO—35,5 " H ₂ —47,7 " CH ₄ —16,8		Для CO—11,5 " H ₂ —64,0 " CH ₄ —24,5	

Как видно из табл. 2, для трубчатой горелки при увеличении доли первичного воздуха в горючей смеси от $\alpha_1 = 0,345$ до $\alpha_3 = 0,580$ величина

$$\gamma \text{ уменьшается: } \gamma_1 = \frac{1,28}{0,88} = 1,45; \gamma_2 = \frac{1,49}{1,05} = 1,42 \text{ и } \gamma_3 = \frac{1,53}{1,62} = 0,95.$$

Из этого следует, что когда в горючей смеси количество первичного воздуха меньше $\frac{1}{2}$ от теоретически необходимого, тогда водород „выгорает“ преимущественно по сравнению с CO и CH₄; когда же доля первичного воздуха больше $\frac{1}{2}$, тогда преимущественная „горючесть“ водорода не сохраняется и уступает место CO и CH₄. Если горючую смесь сжигать на платиновой сетке, то с увеличением доли первичного воздуха относительная „горючесть“ водорода увеличивается.

Сравнивая показатели „горючести“ водорода при сжигании горючих смесей приблизительно одинакового состава в фарфоровой трубке и труб-



чатой горелке без платиновой сетки, приходим к выводу, что „горючесть“ водорода в обоих случаях почти одинаковая и, следовательно, незаметно влияние фарфора, как катализатора на избирательное горение. Сравнивая показатели „горючести“ при сжигании горючих смесей приблизительно одинакового состава ($\alpha_1 = 0,345$ и $\alpha_2 = 0,39$) в платиновой трубке и в обычной трубчатой горелке, приходим к выводу, что относительная „горючесть“ водорода в присутствии платины повышается и при малой доле первичного воздуха.

Наше исследование также показывает, что в горючих смесях, содержащих H₂, CO и CH₄ горение составляющих происходит не избирательно последовательно, а одновременно, но с различной интенсивностью. Если бы горение происходило избирательно последовательно, то при горении смесей, содержащих первичный воздух в количестве большем $\frac{1}{2}$ от теоретически необходимого, в составе продуктов горения должен был бы отсутствовать водород, а при горении смесей с меньшей долей первичного воздуха должны бы оставаться без изменения CO и CH₄, так как

количество воздуха, необходимого для полного выгорания H_2 , соответствует $\alpha = \frac{1}{2}$.

Показателем интенсивности горения H_2 по сравнению с CO может служить отношение

$$\frac{\left(\frac{H_2}{CO}\right) \text{ в горючей смеси}}{\left(\frac{H_2}{CO}\right) \text{ в продуктах горения}} = \delta \quad (2)$$

На рис. 2 изображены кривые $\delta = f(\alpha)$ на основании результатов, приведенных в табл. 2. Кривая 1 показывает изменение $\delta = f(\alpha)$ в отсутствии платинового катализатора и кривая 2 показывает изменение $\delta = f(\alpha)$ в присутствии платинового катализатора.

По характеру кривой 1 усматриваем, что в горючих смесях состава $\alpha < \frac{1}{2}$ интенсивность горения H_2 приблизительно в 1,5 раза больше

интенсивности горения CO ; при увеличении α интенсивности горения H_2 и CO почти одинаковы ($\delta = 0,98$), следовательно „химическое сродство“ кислорода к H_2 и CO в условиях стационарного фронта пламени почти одинаковое. Подтверждением этому может служить сравнение величин свободной энергии образования CO_2 из CO и H_2O из H_2 : $(\Delta F)_{CO_2} = -61400$ ккал/моль и $(\Delta F)_{H_2O} = -54507$ ккал/моль.

Кривая 2 показывает, что в присутствии платинового катализатора интенсивность горения H_2 превышает таковую же для CO в 1,9–3,3 раза по мере увеличения доли первичного воздуха в горючей смеси.

IV. Пламя водяного газа в частично подготовленных горючих смесях (атмосферные горелки)

Сжигание газообразного топлива в горелках с частично подготовленными горючими смесями является довольно распространенным в различных областях техники. Например, в горелках, применяющихся при огневой обработке деталей и сборке электрических ламп, в паяльных и сварочных горелках, в инжекционных газовых горелках, в бытовой газовой аппаратуре, в лабораторной практике и др. Во всех этих случаях в горелки подается или с их помощью образуется в той или иной степени подготовленная горючая смесь, состоящая из горючего газа и воздуха. Обычно в горючей смеси воздух содержится в меньшем количестве, чем это требуется для полного горения газа по стехиометрическим расчетам процесса горения, т. е. в горючих смесях коэффициент избытка воздуха меньше 1. Воздух в горючей смеси является первичным. Недостающее количество воздуха для полного горения или диффундирует из окружающей атмосферы, как это имеет место в атмосферных горелках, или дополнительно в качестве вторичного подается в газосожигательную камеру.

На поверхности фронта, точнее говоря, на некоторой очень незначительной (доли мм) глубине фронта пламени совершается химический акт горения; во внутреннем фронте сгорает газ с первичным воздухом, количество сгоревшего газа зависит от количества первичного воздуха. Во внешнем фронте пламени догорает несгоревший газ с воздухом, диффундирующим из окружающей среды.

В настоящей работе исследован всесторонне вопрос о влиянии на длину внутреннего и внешнего конусов пламени диаметра горелки, скорости истечения, режима движения, состава горючих смесей. Одноре-

менно сделана попытка установить некоторые представления о нормальной (фундаментальной) скорости распространения пламени водяного газа путем измерения высоты (длины) конуса и последующих расчетов; при этом принято, что поверхность фронта пламени имеет правильную коническую форму.

В опытах по исследованию длины пламени и распределения температуры количество газа и воздуха определялось с помощью газометров (рис. 3). Оба газометра одинаковой конструкции, с рабочей емкостью по 17 литров каждый. Устроен каждый из них следующим образом: нижний сосуд „А“ герметичен, он может быть совершенно отключен от атмосферы. Диаметр сосуда 280 мм, высота 500 мм. Внизу он имеет тубус „d“, за-

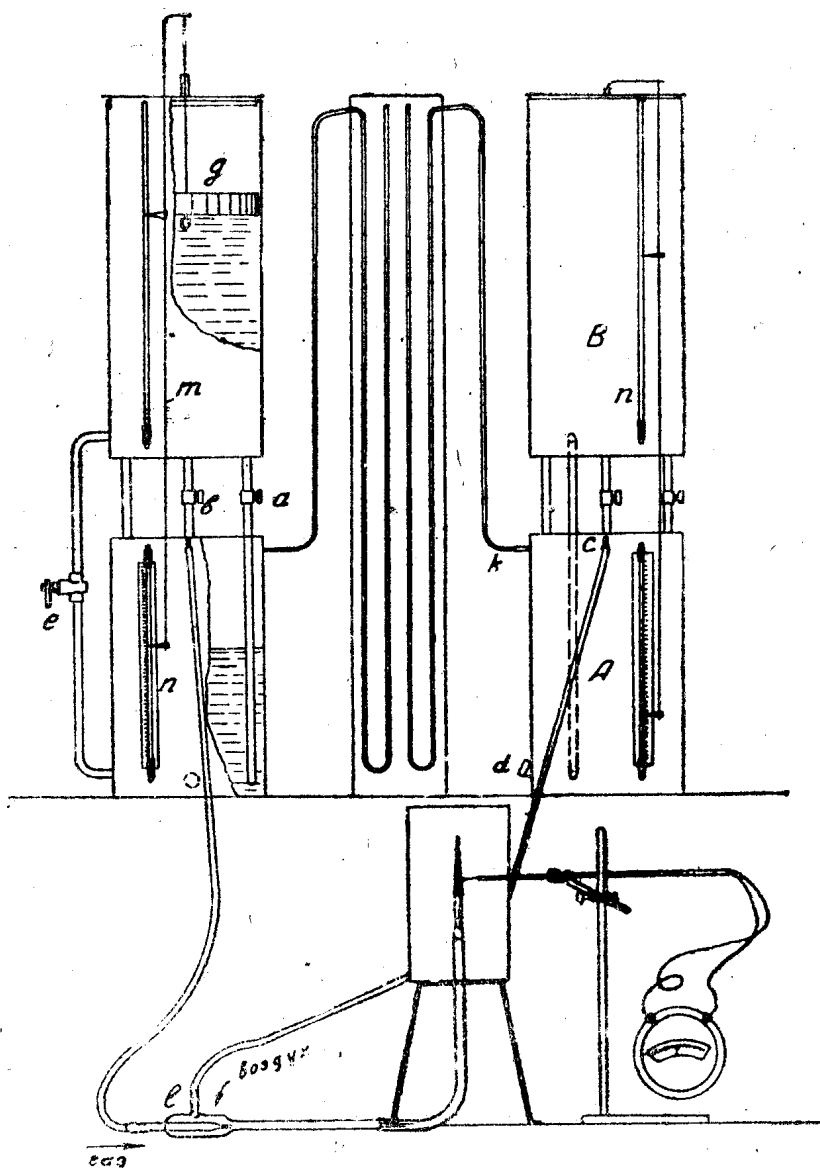


Схема установки для измерения длины факела пламени.

Рис. 3

винчивающийся плотно крышкой с прокладкой, который служит для выпуска из сосуда воды. В верхней части сосуда имеется краник „С“ для выпуска из него набранного газа или воздуха. Сосуд снабжен водомерным стеклом „n“ со шкалой и отводом „К“ для присоединения маномет-

ра. На крышке сосуда „А“ на четырех ножках (трубках) прикреплен верхний напорный сосуд. Диаметр этого сосуда такой же, как и у нижнего, высота 870 мм.

Нижний сосуд сообщается с верхним при помощи крана „b“, установленного в центральной трубке, и крана „a“, установленного в одной из боковых трубок, нижний конец которой опущен почти до самого дна нижнего сосуда.

Для того чтобы поддерживать во время каждого опыта давление газа и воздуха постоянным, было выполнено вспомогательное указывающее устройство, состоящее из цилиндрического поплавка „g“ и вертикального легкого стержня „m“ с двумя стрелками.

При открытом кране „a“ (и „e“) во время опыта приток воды в верхний напорный сосуд регулировался таким образом, чтобы разница уровней воды в верхнем и нижнем сосудах оставалась постоянной, причем обе стрелки должны были совпадать с водными менисками в двух водомерных стеклах (верхнем и нижнем), давление таким образом поддерживалось постоянным, о чем можно было судить и по показаниям манометров.

Перед началом опыта оба газометра заполнялись: один—газом, второй—воздухом, первыми открывались краны „a“ и „c“ газового газометра. Газ поступал через сопло стеклянного инжектора „l“ смесителя к горелке „f“ и поджигался, затем открывались соответствующие краны воздушного газометра.

Регулировка количеств вытекающих газа и воздуха производилась кранами или зажимами на резиновых трубках у смесителя.

После того как получалось пламя желаемого вида, начинался опыт. Одновременно замечались уровни воды по водомерным стеклам обоих газометров и пускались два секундомера, для определения и контроля времени опыта. Затем производились измерения температуры факела пламе-

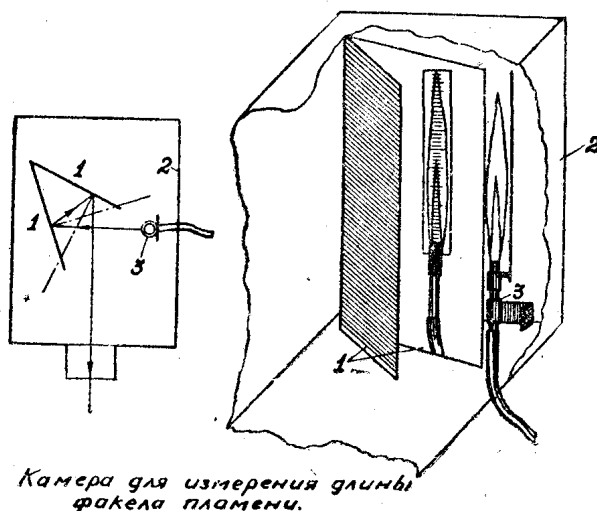


Рис. 4

ни и высоты его. Температура измерялась с помощью Pt—PtRh термопары в нескольких точках факела: в вершине внутреннего конуса, в трех точках, расположенных на одинаковых расстояниях друг от друга по высоте боковой поверхности внутреннего конуса, и в трех точках по высоте внешнего конуса (по оси его).

Измерение длины факела пламени производилось с помощью специального устройства, состоящего из двух зеркал 1—1, расположенных под углом 45° друг к другу, помещенных в металлическую камеру 2 с затемненными стенками (рис. 4).

Благодаря затемнению, изображение пламени получалось более ясным; кроме того, стенки камеры, защищая пламя от влияния колебаний воздуха, помогали производить более точные отсчеты.

К горелке (3) была прикреплена металлическая шкала. В зеркале, расположенном против отверстия камеры, наблюдалось изображение шкалы и, на фоне ее, пламени. Благодаря этому можно было легко делать отсчет, не принимая во внимание искажение размеров изображения.

Опыты проводились с горелками различного диаметра при различных скоростях истечения и составах смеси. Количество вытекающей горючей смеси определялось по объемам газа и воздуха, вытекающим из газометров за время опыта, отмеченное секундомером.

Скорость истечения смеси из устья горелки, коэффициент избытка воздуха, скорость распространения пламени определялись затем расчетным путем.

Состав горючих смесей изменялся от 15,8% до 73,2% водяного газа в горючей смеси, что соответствует коэффициенту избытка воздуха от $\alpha = 2,13$ до $\alpha = 0,14$. Скорости истечения горючих смесей изменялись от 1,58 м/сек до 123,3 м/сек и числа Re—от 738 до 9250. Сжигание горючих смесей производилось с помощью трубчатых горелок диаметром 0,8—1,25—2,9—3,7—5,0—8,0 мм без поджигающего запального пояса и диаметром 1,18—1,54 мм с поджигающим запальным поясом. Такая горелка изображена на рис. 5.

Количество горючей смеси, проходящей через запальный пояс, составляет 12% от всей горючей смеси. С горелками без поджигающего пояса выполнено 57 опытов и с горелками с поджигающим поясом—29 опытов.

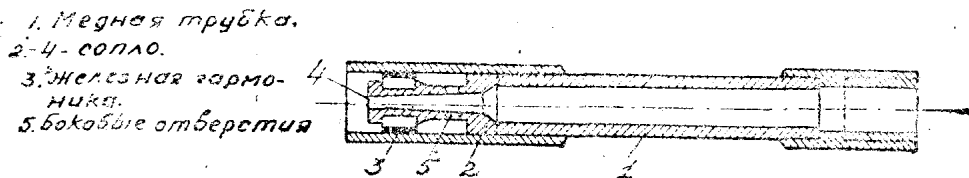


Рис. 5. Горелка с поджиганием

На основании данных по измерению высоты внутреннего конуса пламени по общеизвестному динамическому методу В. А. Михельсона [1] рассчитаны скорости распространения пламени; в зависимости от состава горючих смесей, скорости и режима истечения величина скорости распространения пламени изменялась от 0,19 м/сек для горючих смесей верхнего предельного состава при $\alpha = 0,14$ до 2,27 м/сек для горючих смесей состава $\alpha = 0,98$.

На рис. 6 построены прямые вида

$$h = f\left(\frac{w}{u}\right), \quad (3)$$

изображающие зависимость между высотой внутреннего конуса h , скоростью истечения w и скоростью распространения пламени u для 4 горелок диаметром 1,18—1,54—2,9—3,7 мм. Для горелки любого данного диаметра высота внутреннего конуса h увеличивается пропорционально отношению $\frac{w}{u}$ и коэффициент пропорциональности равен радиусу горелки r , т. е.

$$h = r \frac{w}{u}. \quad (4)$$

Уравнения прямых соответствуют общеизвестному уравнению В. А. Михельсона

$$h = r \sqrt{\frac{w^2}{u^2} - 1}, \quad (5)$$

в котором вследствие больших значений $\left(\frac{w}{u}\right)^2$ отброшена -1 . В наших опытах величина $\left(\frac{w}{u}\right)^2$ изменялась от 360 до 4900.

На рис. 7 построены кривые вида

$$h = f(\alpha), \quad (6)$$

для 4 вышеуказанных горелок, изображающие изменение высоты внутреннего конуса в зависимости от состава горючих смесей. Эти кривые не имеют плавных переходов между отдельными экспериментальными точ-

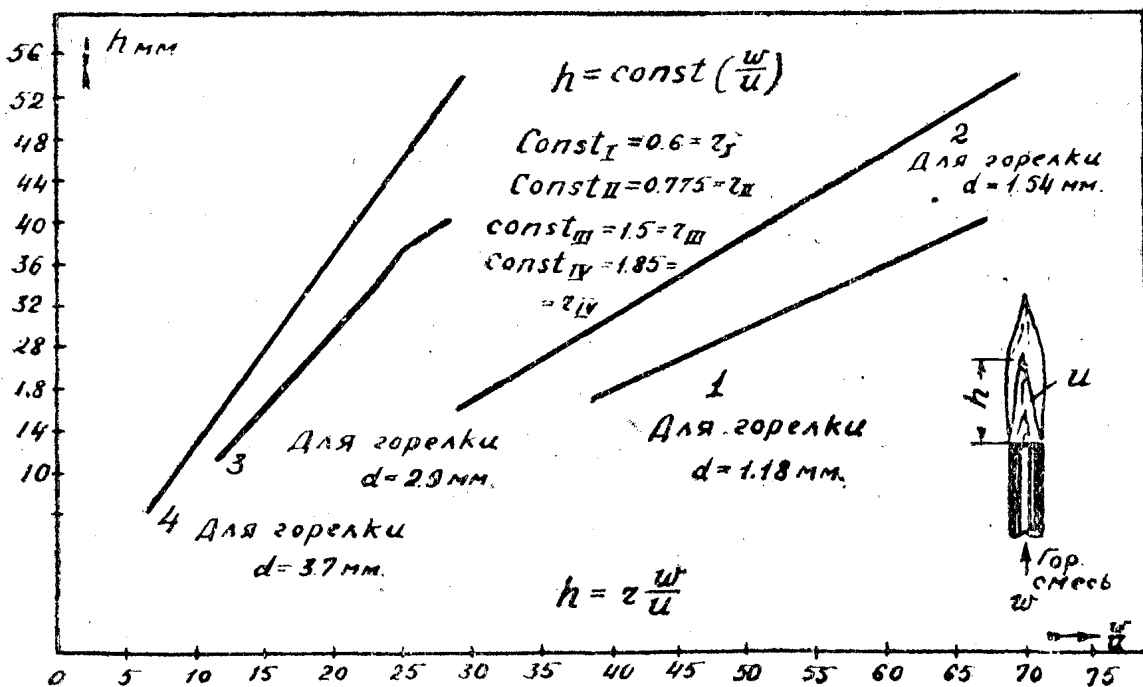


Рис. 6. Изменение длины внутреннего конуса при изменении скорости истечения " w " и скорости распространения пламени " u " для горелок разного диаметра

ками и взаимно пересекаются. Такой неопределенный характер кривых указывает на то, что высота внутреннего конуса зависит одновременно от α , w , Re и d . Для установления более четкой зависимости между высотой внутреннего конуса и указанными факторами в системе координат $\frac{h}{w} m$ и α построены на рис. 8 по экспериментальным данным кривые вида

$$\frac{h}{w} m = f(\alpha)_d. \quad (7)$$

В этом уравнении $m = \frac{Re}{2320}$, причем для ламинарного режима истечения $m = 1$, для переходного режима, когда $5000 > Re > 2320$ величина

Изменение высоты внутреннего конуса пламени в зависимости от состава горючей смеси, скорости, режима истечения и диаметра горелки.

$$h = \varphi(\alpha, w, Re, d)$$

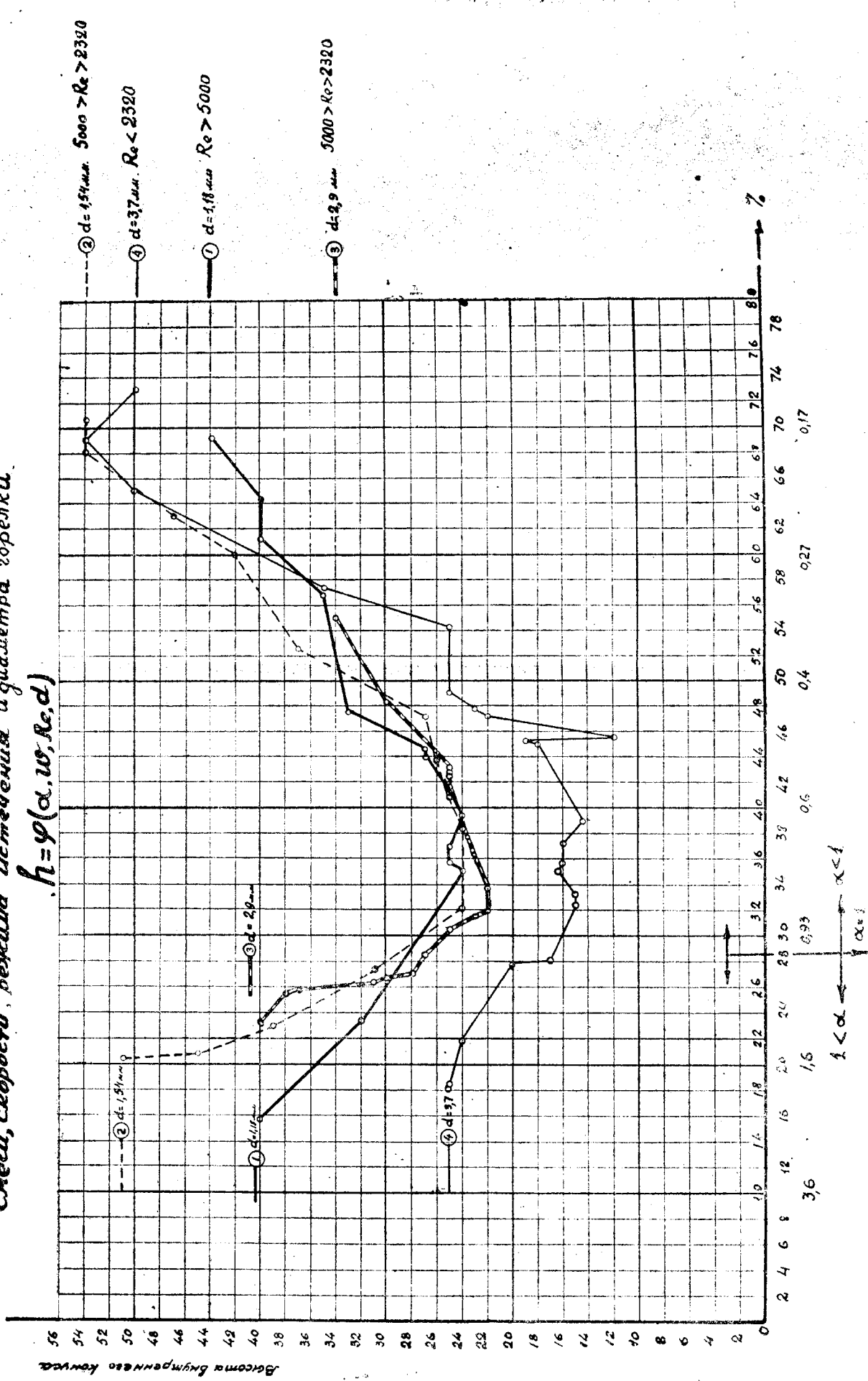


Рис. 7

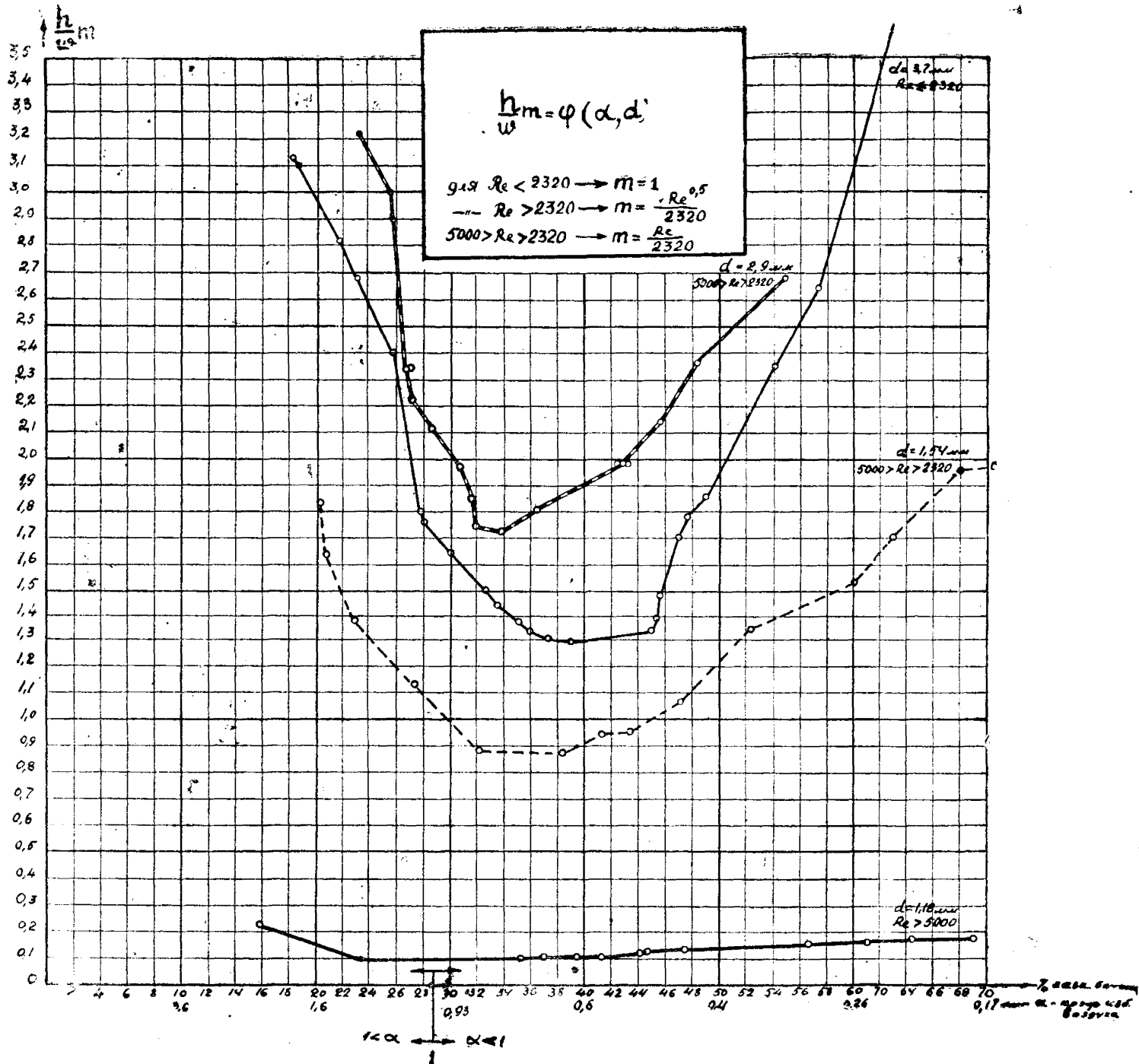


Рис. 8. Обобщенные кривые изменения высоты внутреннего конуса.

$m = \frac{Re}{2320}$ и для устойчивого турбулентного режима, когда $Re > 5000$,

величина $m = \frac{Re^{0,5}}{2320}$.

Из этого следует, что при ламинарном режиме h не зависит от численного значения Re , при переходном режиме h обратно пропорциональна $\frac{Re}{2320}$ и при устойчивом турбулентном режиме h обратно пропорциональна

$\frac{Re^{0,5}}{2320}$ (при построении кривой для турбулентного режима по соображениям масштаба величина m увеличена в 10 раз).

При любом режиме истечения h прямо пропорциональна w и d . Наименьшая высота внутреннего конуса получается для горючих смесей состава от $\alpha = 0,9$ до $\alpha = 0,7$ при прочих равных условиях. При увеличении $\alpha > 1$ и при уменьшении $\alpha < 0,7$ высота внутреннего конуса увеличивается.

На основании экспериментального материала и последующей графоаналитической обработки установлены следующие обобщенные математические зависимости, позволяющие рассчитывать высоту внутреннего конуса для горючих смесей одного и того же состава при изменении d, w и Re , используя для этой цели экспериментальные данные, полученные для какого-либо режима, а именно:

для случая, если режим истечения

ламинарный \rightleftharpoons переходный

$$\frac{h}{wd} Re = \text{const}, \quad (8)$$

для случая, если режим истечения

ламинарный \rightleftharpoons турбулентный

$$\left[\frac{hRe^{0,5}}{wd^{0,65}} \right]_{\text{турб.}} = 35,6 \left(\frac{h}{wd^{0,65}} \right)_{\text{лам.}} \quad (9)$$

Изложенное иллюстрируем примерами.

Определить высоту внутреннего конуса пламени h и скорость распространения пламени u в горючей смеси воляной газ-воздух состава 41,7% газа и 58,3% первичного воздуха ($\alpha = 0,55$) при истечении из горелки диаметром 1,18 мм со скоростью 89,2 м/сек.

Найти также, как изменится h для горелок диаметром 1,54 мм—2,9 мм и 3,7 мм, если состав горючих смесей во всех случаях одинаковый, но изменяется скорость и режим истечения.

1. Для горелки $d_1 = 1,18$ мм при $w_1 = 89,2$ м/сек число $Re_1 = 6850$.

По кривой 1 на рис. 8 по оси ординат для $\alpha = 0,55$ находим

$$\frac{h_1}{w_1} m_1 = 0,1.$$

Так как режим истечения турбулентный, то

$$m_1 = \frac{\sqrt{Re_1}}{2320} = 0,0356.$$

Следовательно, высота внутреннего конуса для горелки $d = 1,18$ мм

$$h_1 = 0,1 \frac{w_1}{10 m_1} = 0,1 \frac{89,2}{0,356} = 25 \text{ мм.}$$

Проверка: по кривой 1 на рис. 7 $h_1 = 25$ мм.
Скорость распространения пламени u находим по уравнению (4) или по кривой на рис. 6. Для горелки $d_1 = 1,18$ мм при $h_1 = 25$ мм

$$\frac{w_1}{u_1} = 42,2,$$

отсюда

$$u_1 = \frac{w_1}{42,2} = \frac{89,2}{42,2} = 2,12 \text{ м/сек.}$$

2. Для горелки $d_2 = 1,54$ мм задаем скорость истечения $w_2 = 48,8$ м/сек, тогда $Re_2 = 4500$; так как режим истечения переходный, то при расчете h_2 по экспериментальным данным, полученным для турбулентного режима, следует использовать уравнение (8),

тогда

$$h_2 = h_1 \frac{w_2 d_2 Re_1}{w_1 d_1 Re_2} = 25 \frac{48,8 \cdot 1,54 \cdot 6850}{89,2 \cdot 1,18 \cdot 4500} = 27 \text{ мм.}$$

Скорость распространения пламени u_2 находим по уравнению (4) или по кривой 2 на рис. 6

$$\frac{w_2}{u_2} = 32,4; u_2 = \frac{w_2}{32,4} = \frac{48,8}{32,4} = 1,5 \text{ м/сек.}$$

Проверка: по кривой 2 на рис. 8.

$$\frac{h_2}{w_2} m_2 = 0,94,$$

но по расчету

$$\frac{h_2}{w_2} m_2 = \frac{27}{48,8} \cdot \frac{4500}{2320} = 1,1.$$

По кривой (2) на рис. 7 величина $h_2 = 25$;
расхождение значений $\frac{h_2}{w_2} m_2$ и h_2 в результате неточности опытов составляет $\frac{27-25}{25} \cdot 100 = 8\%$.

3. Для горелки $d_3 = 2,9$ мм задаем скорость истечения $22,4$ м/сек; тогда $Re_3 = 4100$; так как режим истечения переходный, то при расчете h_3 по экспериментальным данным, полученным для турбулентного режима, следует использовать уравнение (8), тогда

$$h_3 = h_1 \frac{w_3 d_3 Re_1}{w_1 d_1 Re_3} = 25 \frac{22,4 \cdot 2,9 \cdot 6850}{89,2 \cdot 1,18 \cdot 4100} = 25,8 \text{ мм.}$$

Скорость распространения пламени по кривой (3) на рис. 6

$$\frac{w_3}{u_3} = 17,2; u_3 = \frac{w_3}{17,2} = \frac{22,4}{17,2} = 1,13 \text{ м/сек.}$$

Проверка: по кривой (3) на рис. 7 $h_3 = 25$ мм и по кривой (3) на рис. 8

$$\frac{h_3}{w_3} m_3 = 1,99;$$

по расчету

$$\frac{h_3}{w_3} m_3 = \frac{25,8 \cdot 4100}{22,4 \cdot 2320} = 2,01,$$

расхождение незначительное.

4. Для горелки $d_4 = 3,7$ мм задаем скорость истечения 11,2 м/сек, тогда $Re_4 = 2240$; так как режим истечения ламинарный, то при расчете h_4 по экспериментальным данным, полученным для турбулентного режима, следует использовать уравнение (9), тогда

$$h_4 = h_1 \frac{Re^{0,5} w_4}{35,6 w_1} \left(\frac{d_4}{d_1} \right)^{0,65} = 25 \frac{\sqrt{6850} \cdot 11,2}{35,6 \cdot 89,2} \left(\frac{3,7}{1,18} \right)^{0,65} = 15,2 \text{ мм.}$$

Скорость распространения пламени по кривой (4) на рис. 6

$$\frac{w_4}{u_4} = 8,1; u_4 = \frac{11,2}{8,1} = 1,37 \text{ м/сек.}$$

Проверка: по кривой (4) на рис. 7

$h_4 = 15,0$ мм и по кривой (4) на рис. 8

$$\frac{h_4}{w_4} m_4 = 13,1.$$

По расчету

$$\frac{h_4}{w_4} m_4 = \frac{15,2}{11,2} = 13,5,$$

расхождение незначительное.

Существенно важной характеристикой факела пламени частично подготовленных горючих смесей является соотношение между высотой внутреннего конуса h и полной длиной факела L . На рис. 9 изображены кривые вида

$$\frac{h}{L} = \varphi(\alpha) \quad (11)$$

для горелок диаметром 1,18 мм—1,54 мм—2,9 мм—3,7 мм. Как видно из рисунка, кривые составляют две группы: одна группа—кривые (1) и (2) для горелок диаметром 1,18 и 1,54 мм и вторая группа—кривые 2 и 4 для горелок диаметром 2,9 и 3,7 мм. Первая группа кривых—для турбулентного или близкого к нему режима истечения, вторая группа—для ламинарного режима. Обе группы кривых имеют характерный перегиб с минимальным значением $\frac{h}{L}$ при $\alpha \sim 0,5$. Про-

следим за изменением отношения $\frac{h}{L}$ для горелок диаметром 1,18 мм и 1,54 мм. При малых значениях α длина факела наибольшая и высота внутреннего конуса составляет около половины длины факела; при увеличении α длина факела L сокращается, но еще быстрее сокращается высота внутреннего конуса, достигая при $\alpha \sim 0,5$ минимального значения $\frac{h}{L}$; при дальнейшем увеличении α происходит дальнейшее сокращение

L и h , но h уменьшается медленнее, чем L , вследствие чего отношение $\frac{h}{L}$ увеличивается. Когда α приближается к 1, то внутренний и внешний конусы сливаются. Аналогично изменяется $\frac{h}{L}$ и для горелок диаметром 2,9 мм и 3,7 мм. Таким образом можно сделать вывод, что при турбулентном режиме истечения в горючих смесях водяной газ-воздух общая

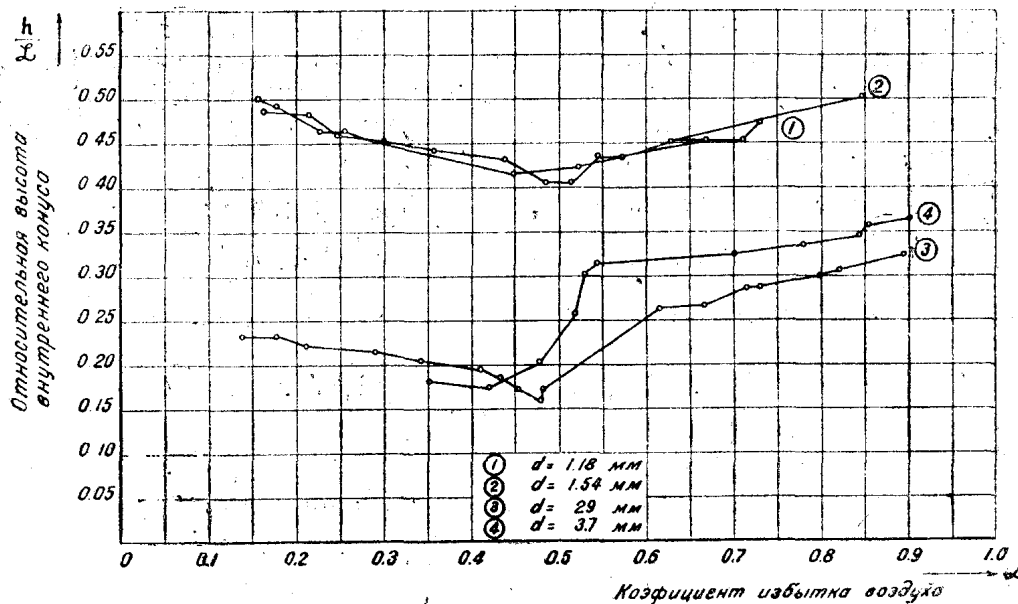


Рис. 9. Зависимость между высотой внутреннего конуса h мм, длиной факела L мм, составом горючих смесей L и диаметром горелок.

длина факела в 2—2,5 раза больше высоты внутреннего конуса, а при ламинарном режиме истечения общая длина факела в 5,5—6,5 раза больше высоты внутреннего конуса.

Опытами по сжиганию газокислородных смесей установлено, что относительная высота внутреннего конуса резко сокращается по сравнению с газоздушными смесями; так, для газокислородных горючих смесей состава $\alpha \sim 0,5$ величина $\frac{h}{L} \sim 0,1$ при турбулентном режиме истечения.

Это объясняется тем, что в газокислородных смесях скорость распространения пламени значительно больше, чем в газоздушных, вследствие чего h значительно уменьшается.

При горении воздушных смесей естественного газа, содержащего CH_4 больше 87%, величина $\frac{h}{L}$ сильно увеличивается и составляет приблизительно 0,8—0,9; вследствие малой скорости распространения пламени метана высота внутреннего конуса h сильно увеличивается.

Пирометрические характеристики факела пламени в частично подготовленных горючих смесях

Тепловая плотность горения. Тепловая плотность горения есть количество тепла, выделяющегося при горении в единицу времени на единице поверхности внутреннего конуса, т. е.

$$q \frac{\text{ккал}}{\text{м}^2\text{сек}}$$

$\frac{q}{U}$

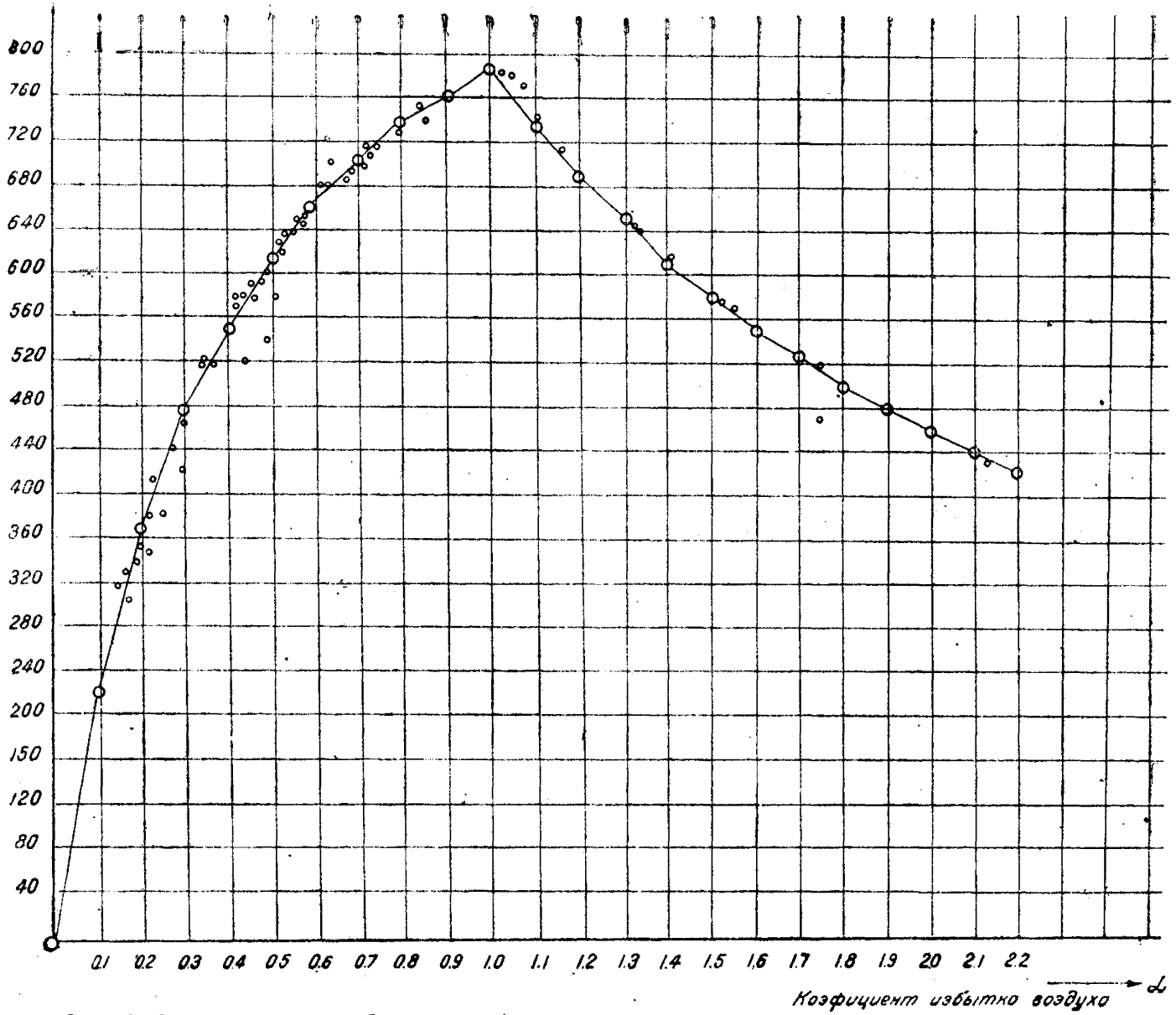


Рис 10 Зависимость между тепловой плотностью горения q $\frac{\text{kcal}}{\text{м}^2 \cdot \text{сек}}$, скоростью распространения пламени U $\frac{\text{м}}{\text{сек}}$ и составом горючих смесей.

На рис. 10 изображена кривая вида

$$\frac{q}{u} = \psi(\alpha), \quad (12)$$

показывающая зависимость между тепловой плотностью горения q , скоростью распространения пламени u и составом горючих смесей α для горелок диаметром 1,18 мм—1,54 мм—2,9 мм—3,7 мм. При исследовании факела пламени этих горелок величина q изменялась от 59 $\frac{\text{ккал}}{\text{м}^2\text{сек}}$ до 1515 $\frac{\text{ккал}}{\text{м}^2\text{сек}}$. Однако отношение $\frac{q}{u}$ не зависит от диаметра горелки и режима истечения, а зависит только от состава горючих смесей. В самом деле, согласно определению

$$q = \frac{V'_{\text{газ}} Q_{\text{H}}^p}{F}, \quad (13)$$

где $V'_{\text{газ}}$ $\text{м}^3/\text{сек}$ —количество газа, сгоревшего на поверхности внутреннего конуса, $F \text{ м}^2$ —поверхность внутреннего конуса и Q_{H}^p —теплотворная способность газа.

В горючих смесях с недостатком первичного воздуха количество сгоревшего газа на поверхности внутреннего конуса определяется количеством первичного воздуха, т. е.

$$V'_{\text{газ}} = \frac{V_{\text{возд}}}{V_{\text{теор}}} = \frac{\alpha V_{\text{теор}} V_{\text{газ}}}{V_{\text{теор}}} = \alpha V_{\text{газ}}. \quad (14)$$

Здесь $V_{\text{возд}}$ $\text{м}^3/\text{сек}$ —количество первичного воздуха; $V_{\text{теор}}$ $\frac{\text{м}^3}{\text{м}^3}$ —теоретически необходимое количество воздуха; $V_{\text{газ}}$ $\text{м}^3/\text{сек}$ —количество газа в горючей смеси. Но в соответствии с методом определения

$$u = \frac{V_{\text{см}}}{F} = \frac{V_{\text{газ}} + V_{\text{возд}}}{F} = \frac{V_{\text{газ}} + \alpha V_{\text{теор}} V_{\text{газ}}}{F} = \frac{V_{\text{газ}}(1 + \alpha V_{\text{теор}})}{F},$$

здесь $V_{\text{см}}$ $\text{м}^3/\text{сек}$ —количество горючей смеси. Следовательно,

$$\frac{q}{u} = \frac{\alpha V_{\text{газ}} Q_{\text{H}}^p}{V_{\text{газ}}(1 + \alpha V_{\text{теор}})} = \frac{\alpha Q_{\text{H}}^p}{1 + \alpha V_{\text{теор}}} = \frac{Q_{\text{H}}^p}{\frac{1}{\alpha} + V_{\text{теор}}}. \quad (15)$$

В горючих смесях с избытком первичного воздуха образуется одноконусный факел пламени и на поверхности его сгорает весь подводимый в горелку газ, следовательно,

$$\frac{q}{u} = \frac{V_{\text{газ}} Q_{\text{H}}^p}{V_{\text{см}}} = \frac{V_{\text{газ}} Q_{\text{H}}^p}{V_{\text{газ}}(1 + \alpha V_{\text{теор}})} = \frac{Q_{\text{H}}^p}{1 + \alpha V_{\text{теор}}}. \quad (16)$$

Таким образом, для горючих смесей обоих типов согласно уравнениям (15) и (16) величина $\frac{q}{u}$ не зависит от диаметра горелки и режима истечения, а является функцией α .

Температура факела пламени. Температура поверхности внутреннего и внешнего конусов пламени измерялась в нескольких точках Pt—PtRh термомпарами. Результаты измерения обработаны графически в виде кривых

$$\frac{t}{q/u} = f(\alpha). \quad (17)$$

Как видно из рис. 11, как в области малых значений α (от 0,14 до 0,6), так и в области больших значений ($\alpha > 1,2$) температура факела зависит от величины $\frac{q}{u}$ и от диаметра горелки. Но в области значений α от 0,6 до 1,2, т. е. в наиболее практически важной, на температуру факела диаметр горелки оказывает малое влияние; в этой области значений α температура факела зависит от величины $\frac{q}{u}$, т. е. в конечном счете от состава горючих смесей. Математически эта зависимость выражается, как видно из рис. 11, эмпирическим уравнением

$$\frac{t}{q/u} = 1,75 \div 1,9$$

или приближенно в среднем

$$\frac{t}{q/u} = 1,82,$$

т. е.

$$t = 1,82 \frac{q}{u}. \quad (18)$$

Температура на поверхности внешнего конуса пламени меньше температуры на поверхности внутреннего конуса на 50–80 °С, чем меньше α , тем больше эта разность; при $\alpha \sim 1$ разность температур равна нулю.

В дополнение к ранее приведенным примерам, иллюстрировавшим возможность расчетов длины факела по выведенным нами соотношениям, определим пирометрические характеристики факела.

Для условий 1 примера, т. е. для горелки $d_1 = 1,18$ мм.

По рис. 10 для $\alpha_1 = 0,55$

$$\frac{q_1}{u_1} = 650 \text{ и } q_1 = 650 \text{ и } u_1 = 650 \cdot 2,12 = 1360 \frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \text{сек}}$$

По рис. 11 для $\alpha_1 = 0,55$

$$\frac{t_1}{q_1/u_1} = 2,24 \text{ и } t_1 = 2,24 \frac{q_1}{u_1} = 2,24 \cdot 650 = 1460 \text{ }^\circ\text{С}.$$

По рис. 9 для $\alpha_1 = 0,55$

$$\frac{h_1}{L_1} = 0,425; L_1 = \frac{h_1}{0,425} = \frac{25}{0,425} = 59 \text{ мм}.$$

Для условий 2 примера, т. е. для горелки $d_2 = 1,54$ мм по рис. 10, 11, 9 для $\alpha_2 = 0,57$

$$\frac{q_2}{u_2} = 650; q_2 = 650; u_2 = 650 \cdot 1,5 = 975 \frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \text{сек}};$$

$$\frac{t_2}{q_2/u_2} = 2; t_2 = 2 \frac{q_2}{u_2} = 2 \cdot 650 = 1300 \text{ }^\circ\text{С};$$

$$\frac{h_2}{L_2} = 0,425; L_2 = \frac{h_2}{0,425} = \frac{27}{0,425} = 64 \text{ мм}.$$

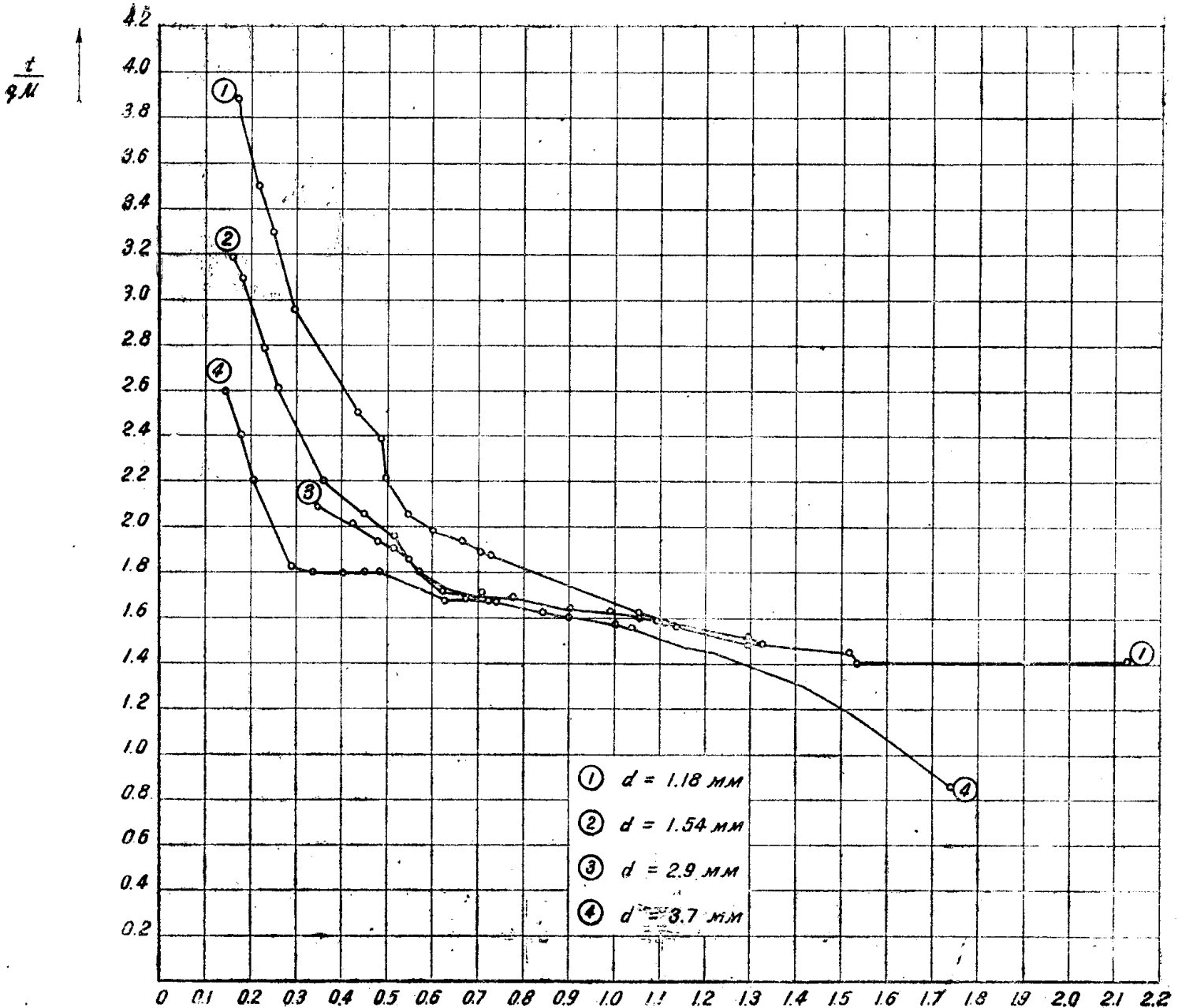


Рис. 11. Зависимость между температурой факела $t^{\circ}\text{C}$, тепловой плотностью горения $q \frac{\text{ккал}}{\text{м}^2\text{сек}}$, скоростью распространения пламени $U \frac{\text{м}}{\text{сек}}$, составом горючих смесей α и диаметром горелок.

Для условий 3 примера, т. е. для горелки $d_3 = 2,9$ мм

$$\frac{q_1}{u_3} = 630; q_3 = 630 u_3 = 630 \cdot 1,3 = 820 \frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \text{сек}};$$

$$\frac{t_3}{q_3/u_3} = 2,11; t_3 = 630 \cdot 2,11 = 1320^\circ \text{C};$$

$$\frac{h_3}{L_3} = 0,31; L_3 = \frac{h_3}{0,31} = \frac{25}{0,31} = 80 \text{ мм.}$$

Для условий 4 примера, т. е. для горелки $d_4 = 3,7$ мм

$$\frac{q_4}{u_4} = 680; q_4 = 680 \cdot 1,41 = 960 \frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \text{сек}};$$

$$\frac{t_4}{q_4/u_4} = 1,90; t_4 = 680 \cdot 1,90 = 1300^\circ \text{C};$$

$$\frac{h_4}{L_4} = 0,26; L_4 = \frac{h_4}{0,26} = \frac{15,5}{0,26} = 56 \text{ мм.}$$

Установленные экспериментальные зависимости позволяют предполагать и надеяться, что полученные результаты и обобщенные зависимости могут быть использованы при проектировании и регулировании газовых горелок факельного горения.

Как указывалось выше, пламя водяного газа частично подготовленных горючих смесей используется для огневой обработки в процессе производства электрических ламп накаливания на некоторых заводах. Для изучения режима настройки огня, нами было выполнено исследование в производственных условиях на Томском электроламповом заводе. В качестве объекта исследования был взят восьмизноздовой полуавтомат для сборки ножек электроламп. На рис. 12 представлен фотоснимок полуавтомата.

Процессы обработки ножки на отдельных позициях состоят в следующем: на первой позиции в мягком пламени горелок, установленных с двух сторон, стеклянные детали ножки нагреваются при вращательном движении клещей; на второй позиции стекло разогревается докрасна от пламени горелок, также расположенных с двух сторон; на третьей позиции размягчаются лопаточка, штабик и штенгель также под влиянием двухстороннего нагревания. Во время перехода клещей с третьей позиции на четвертую производится штамповка лопаточки ножки. На четвертой позиции через штенгель ножки вдувается сжатый подогретый воздух, струя воздуха разрывает размягченное стекло, образуется отверстие, через которое впоследствии будет выкачиваться воздух из вакуумной лампы. На пятой позиции оплавляется пробитое отверстие и прогревается шейка и лопаточка ножки, на шестой — производится частичное охлаждение ножки в атмосфере слабого пламени; на седьмой — готовая ножка извлекается из клещей и на восьмой позиции производится очередная загрузка полуфабрикатов. Подробное описание процессов сборки электроламп изложено в книге Л. Г. Ульмишева [7].

Испытанный нами полуавтомат оборудован инжекционными газовыми горелками, аналогичными описанным выше. Горелки собираются в группы из трех, образуя скрещивающиеся огни. Общий вид горелок со скрещивающимися огнями представлен на рис. 13.

При исследованиях производились измерения следующих величин: температуры в вершине внутреннего конуса факела пламени, температуры

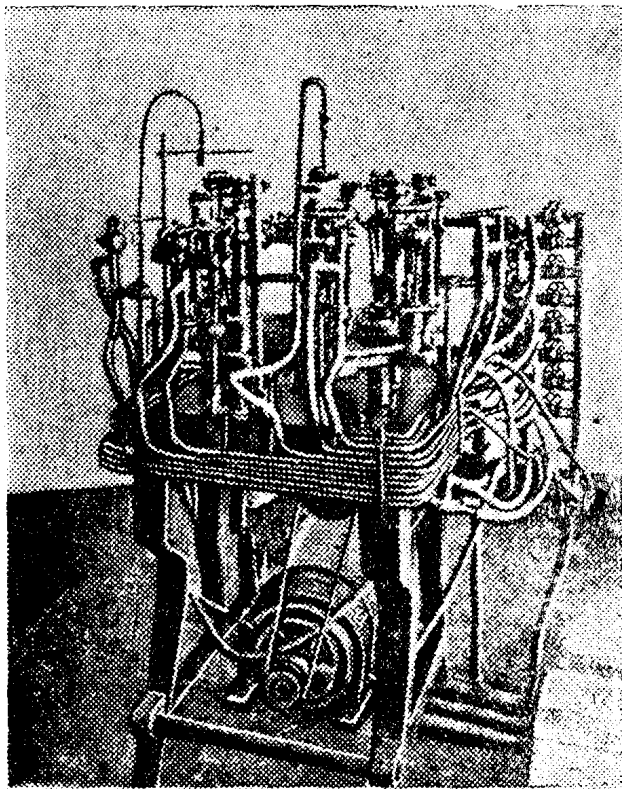


Рис. 12. Восьмигнездовой полуавтомат для сборки ножек электроламп.

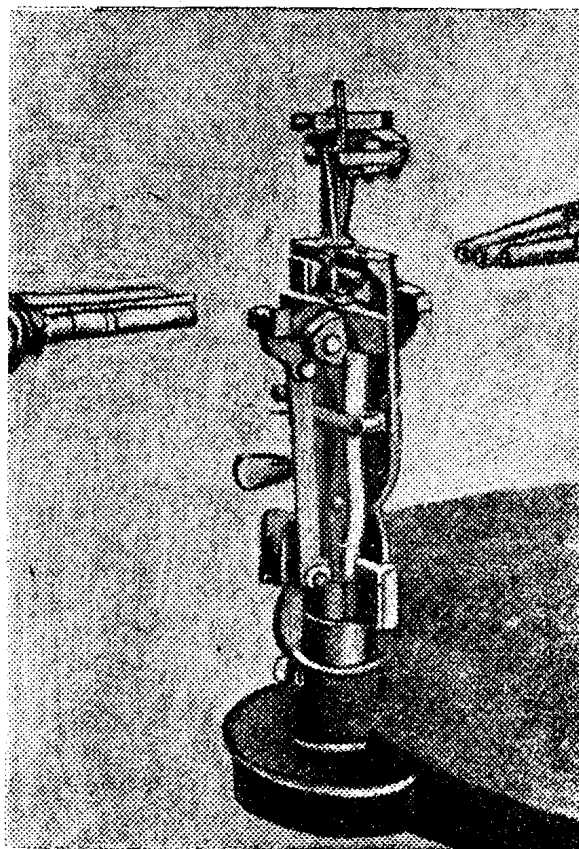


Рис. 13

в месте скрещивания огней, длины внутреннего конуса, анализа горючей смеси и давления газа, воздуха и горючей смеси.

Схема измерений изображена на рис. 14.

В таблице 3 приведены сводные результаты исследования для горелки диаметром 1,2 мм.

Сравним полученные в производственных условиях результаты исследования с таковыми же, полученными в лабораторных условиях для горелки диаметром 1,18 мм. Температура факела пламени в производственных условиях значительно ниже, чем в лабораторных условиях для горючих смесей одинакового состава. Так, для горелки диаметром 1,18 мм, испытанной в лабораторных условиях, при составе горючей смеси: 35 ÷ 37% газа и 65 ÷ 63% воздуха ($\alpha = 0,37 \div 0,67$), температура факела приблизительно 1500°C, между тем как для горелки диаметром 1,2 мм, испытанной в производственных условиях при том же, приблизительно, составе горючей смеси, температура факела не превышает 1260°C. Такая резкая разница в температуре обусловлена большим различием в скоростях истечения горючих смесей: в лабораторной горелке скорость истечения приблизительно равна 80 м/сек, а в производственной горелке скорость истечения изменялась в пределах 25—43 м/сек. Так же влиянием пониженной скорости истечения в производственных условиях следует объяснить и меньшую высоту внутреннего конуса факела: для горелки в производственных условиях высота внутреннего конуса изменялась от 12,6 мм до 22,8, а для лабораторной горелки—24 мм.

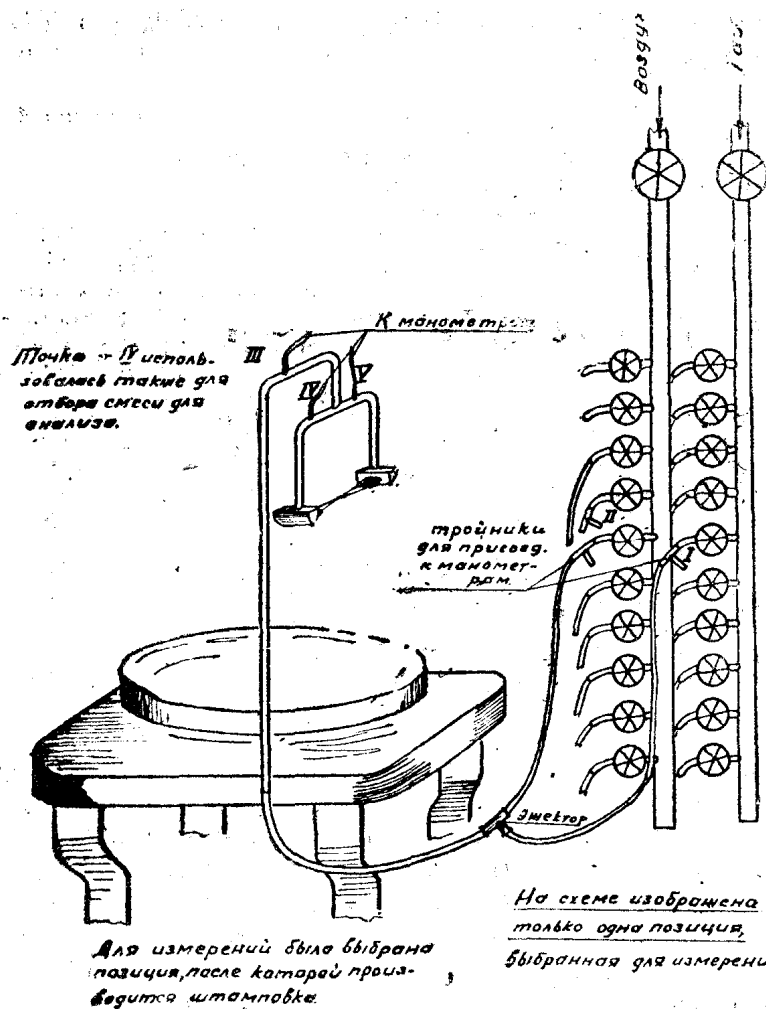


Рис. 14. Схема измерений на ножечном полуавтомате.

Таблица 3

Показатели испытания инжекционной горелки диаметром 1,2 мм на сборном полуавтомате

№ пп.	Давление горючей смеси перед горелкой мм в. с.	Скорость истечения мм/сек	Состав горючей смеси			Высота внутренне-го конуса мм	Температура °С	
			газ %	воздух %	α		в вершине внутренне-го конуса	в месте скрещива-ния огней
1	141	34,0	62,0	38,0	0,23	14,8	1130	1080
2	164	36,8	62,0	38,0	0,23	20,0	1130	1100
3	150	35,0	51,2	48,8	0,36	18,3	1065	1090
4	157	36,0	51,2	48,8	0,36	21,0	1155	1130
5	153	35,2	46,1	53,9	0,45	23,4	1130	1105
6	159	36,0	40,5	59,5	0,56	20,0	1175	1130
7	159	35,9	38,0	62,0	0,62	18,9	1090	1130
8	142	34,0	34,2	65,8	0,73	22,8	1058	1065
9	206	41,0	34,2	65,8	0,73	16,8	1145	1114
10	90	25,0	33,3	66,7	0,76	12,6	1100	790
11	95	27,8	33,3	66,7	0,76	12,8	1100	800
12	107	29,6	33,3	66,7	0,76	13,0	1140	940
13	124	32,0	33,3	66,7	0,76	14,2	1220	1000
14	144	33,0	33,3	66,7	0,76	15,2	1240	1080
15	226	43,0	33,3	66,7	0,76	18,8	1260	1170
16	264	46,5	32,6	67,4	0,79	19,8	1260	1170
17	187	39,0	31,7	68,3	0,82	16,2	1200	1170
18	174	38,0	31,7	68,3	0,82	15,7	1205	1070

Затем также в производственных условиях была испытана горелка диаметром 1,5 мм на полуавтомате для сборки ножек. Результаты исследования представлены в табл. 4.

Таблица 4

Показатели испытания инжекционной горелки диаметром 1,5 мм на сборочном полуавтомате

№ пп.	Давление горючей смеси перед горелкой мм в. с.	Скорость истечения м/сек	Состав горючей смеси			Высота внутреннего конуса мм	Температура °С	
			газ %	воздух %	α		в вершине внутреннего конуса	в месте скрещивания огней
1	470	62,0	65,0	35,0	0,2	48,1	1160	1275
2	462	61,5	54,0	46,00	0,33	47,8	1100	1275
3	452	61,0	52,0	48,0	0,35	34,9	1170	1290
4	620	71,0	52,0	48,0	0,35	47,6	1240	1290
5	452	61,0	50,5	49,5	0,37	34,2	1220	1280
6	600	70,0	50,5	49,5	0,37	46,5	1255	1305
7	600	70,0	48,0	52,0	0,41	41,2	1265	1305
8	432	59,0	47,6	52,4	0,42	39,1	1160	1300
9	428	58,8	44,3	55,7	0,47	29,0	1220	1275
10	590	69,3	41,6	58,4	0,53	39,0	1285	1310
11	580	69,2	40,0	60,0	0,57	33,0	1290	1310

Сравнивая полученные в производственных условиях результаты исследования с таковыми же, полученными в лабораторных условиях для горелки диаметром 1,54 мм, констатируем, что в обоих случаях температуры в факеле пламени получены одного и того же порядка для горючих смесей, приблизительно, одинакового состава, но высота внутреннего конуса факела для горелки в производственных условиях несколько большая, чем для горелки в лабораторных условиях. Приблизительное совпадение температуры в обоих случаях и небольшое расхождение в высотах внутреннего конуса объясняется тем, что скорости истечения горючей смеси в производственных горелках имеют несколько большее значение.

V. Поверхностное беспламенное горение водяного газа

Одной из форм горения газов является поверхностное каталитическое беспламенное горение; это горение характеризуется следующим: 1) газ и воздух перед поступлением их в горелку предварительно тщательно смешиваются до состояния однородной смеси; 2) горючая смесь сжигается на поверхности огнеупорного материала горелки, имеющего высокую температуру и оказывающего каталитическое воздействие на процесс горения.

Внешними признаками поверхностного горения является полное или почти полное отсутствие видимого фронта пламени. Фронт пламени совмещается с поверхностью каталитически активных огнеупорных материалов или находится в порах зернистого слоя. Вследствие высокой тепловой плотности горения поверхность горелки или слоя обладает интенсивным тепловым излучением.

Условия взаимного превращения различных форм горения газов сформулированы автором [2].

При поверхностном горении фронт пламени значительно деформируется под влиянием гидродинамических, тепловых, каталитических и других явлений. Причины, влияющие на деформацию нормального конического фронта пламени, следующие: а) вследствие увеличения скорости истечения горючей смеси параболическая эпюра распределения скоростей по сечению

потока спрямляется, вследствие чего конический фронт пламени становится плоским; б) поверхность фронта пламени, при переходе от факельного горения к беспламенному, уменьшается, вследствие чего тепловыделение при горении сосредоточивается на меньшей поверхности; в) при поверхностном горении скорость распространения пламени увеличивается в десятки и сотни раз по сравнению с таковыми же при факельном горении.

Исследование поверхностного беспламенного горения водяного газа производилось следующими способами: 1) сжиганием в кварцевой трубке, заполненной огнеупорными зернами; 2) сжиганием в опытной печи с зернистым слоем и 3) сжиганием в канальной горелке. Опыты по сжиганию водяного газа в кварцевой трубке и в опытной печи с зернистым слоем описаны в опубликованной работе автора [2], а также частично приведены в монографии проф. М. Б. Равича [6]. Что же касается сжигания водяного газа в канальной горелке, то об этом сообщается в настоящей работе.

Канальная горелка—огнеупорный блок сделана из высокоглиноземистого огнеупорного шамотного материала. Размеры блока: наружный диаметр 195 мм, толщина 100 мм. В блоке 48 отверстий диаметром 3/15 мм. Чертеж горелки приведен на рис. 15.

Скорость прохождения горючей смеси через узкие отверстия диаметром 3 мм составила 20 м/сек и через широкие отверстия диаметром 15 мм—0,8 м/сек. Расход газа в горелке 7 м³/час и воздуха 18 м³/час, состав горючей смеси соответствует коэффициенту избытка воздуха $\alpha = 1,02$.

Давление в смесителе 50 мм вод. ст. При таком гидравлическом режиме проскоков пламени в подводящую камеру и в смеситель не наблюдалось. Накал на поверхности и внутри блока равномерный, температура, измеренная оптическим пирометром, около 1500°C.

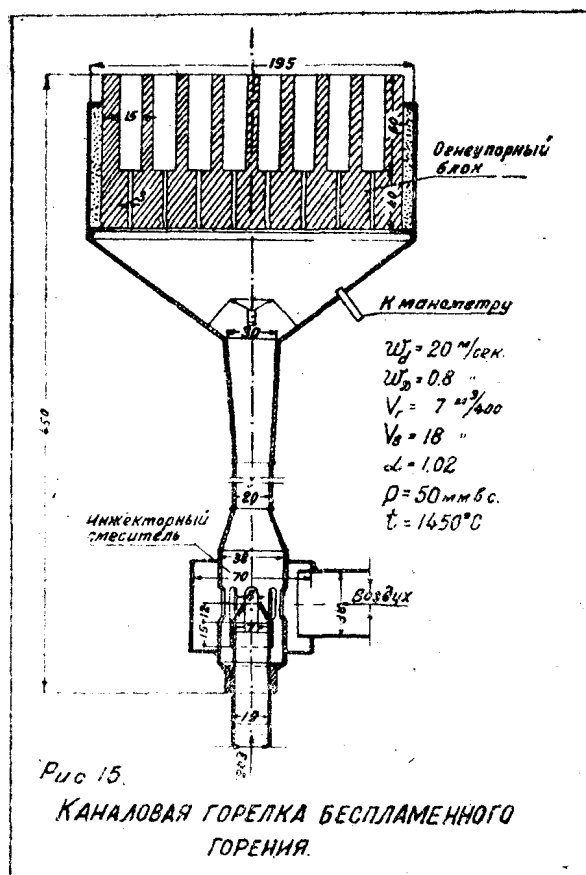
Поверхностная тепловая напряженность горения, т. е. количество выделяющегося тепла, отнесенное к излучающей поверхности горелки, составила в среднем 65000 ккал/м²час.

Объемная тепловая напряженность горения, т. е. количество выделяющегося тепла, отнесенное к объему каналов в блоке, составила 37 · 10⁶ ккал/м³час.

VI. Заключение

Автором выполнено комплексное исследование горения водяного газа. Это исследование подтверждает положение автора о взаимной превращаемости основных типичных форм горения газов и выявляет специфические для каждой формы условия устойчивого развития горения.

Исследование горения водяного газа производилось в лабораторных



условиях, в обстановке, приближающейся к производственным условиям, и в промышленных тепловых установках.

Так, в лабораторных условиях выполнено исследование структуры пламени водяного газа путем разделения двухконусного пламени, влияние платины как катализатора на процесс горения, влияние состава горючих смесей, диаметра горелок и режима истечения на длину факела и распределение температуры и теплонапряженность в факеле; диффузионное горение водяного газа в плоскощелевых атмосферных горелках; поверхностное беспламенное горение водяного газа и влияние гранулометрического состава зернистого слоя на устойчивость и тепловую напряженность.

Исследование диффузионного горения в экранированной топочной камере проведено в обстановке по масштабам и условиям, приближающимся к производственным. Подробное описание исследования диффузионного горения водяного газа освещено в статье автора [5]. Работа и конструкция промышленной ванной стекловаренной печи, построенной по проекту автора на одном государственном союзном заводе, производящем электрические лампы накаливания, описана автором в статье [4].

Объектом исследования являлся водяной газ, производимый при газификации тощих каменных углей.

Наиболее существенными результатами комплексного исследования горения водяного газа являются следующие.

1. При исследовании структуры пламени водяного газа методом двухконусного раздельного горения в горелках Бунзена, Меккера, с платиновой сеткой, а также в фарфоровой и платиновой трубках установлена последовательность выгорания отдельных составляющих водяного газа и влияние доли первичного воздуха и платины на последовательность выгорания.

2. При исследовании пламени водяного газа в частично подготовленных горючих смесях с помощью горелок разного диаметра и конструкции установлена зависимость между длиной факела, скоростью истечения, характером движения, диаметром горелок, составом горючих смесей и распределением температуры в факеле. Есть все основания считать, что полученный фактический материал и математические зависимости могут быть положены в основу при проектировании атмосферных горелок и при регулировании огневого режима в промышленных установках в процессе эксплуатации.

3. При исследовании диффузионного пламени водяного газа плоскощелевой атмосферной горелки и в экранированной топочной камере показано, что несмотря на ряд затруднений, возникающих при практическом пользовании математическим аппаратом физической теории диффузии, несмотря на неизбежность вводить те или иные упрощающие допущения, все же возможен и необходим предварительный расчет диффузионного факела, так как действительно наблюдаемые в опытах величины являются довольно близкими к расчетным. Кроме того предлагается метод расчета диффузионного факела при неодинаковых скоростях истечения газа и воздуха с помощью эквивалентной толщины диффузионного слоя.

4. По проекту автора построена ванная стекловаренная печь на водяном газе с подогревом воздуха в регенераторах. Эта печь находится в эксплуатации на одном электроламповом заводе с 1944 года. Отличительная особенность печи автора—малые габаритные размеры; удачное же проектирование малогабаритных ванн печей, как известно, является затруднительным, а опытных данных в распоряжении автора не было.

5. При исследовании поверхностного горения водяного газа в зернистом слое и в каналовой горелке выявлены условия устойчивости этого процесса, влияние диаметра и удельного веса зерен, составляющих слой, и достигнут пирометрический коэффициент горения 0,85. Результаты этого

исследования могут быть положены в основу проектирования высокотемпературных муфельных (тигельных) печей, работающих на холодной горючей смеси.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. В. А. Михельсон. Собрание сочинений, т. 1, 1930.
2. Н. Н. Норкин. Изв. Томского политехнического института, т. 64, 1948.
3. Н. Н. Норкин и Г. Д. Спецци. Изв. Томского политехнического института, т. 66, в. 3, 1948.
4. Н. Н. Норкин. Изв. Томского политехнического института т. 64, 1948.
5. Н. Н. Норкин. Изв. Томского политехнического института, т. 70, 1950.
6. М. Б. Равич. Поверхностное беспламенное горение. Изд. АН СССР, 1949.
7. Л. Г. Ульмишек. Производство электрических ламп накаливания, 1949.