



ния их в горелке; смешение газового и воздушного потоков происходит в рабочем пространстве тепловой установки (в топке, в печи), вследствие молекулярной диффузии компонентов газа и воздуха;

б) скорости истечения газового и воздушного потоков из горелки должны быть одинаковыми и должны находиться в пределах ламинарного режима. Эти условия протекания процесса диффузионного горения довольно точно могут быть заранее рассчитаны с помощью следующих уравнений:

Уравнение диффузии Фика

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

$$w_{\text{газ.}} = w_{\text{возд.}} = \text{idem} \quad (2)$$

$$Re = \frac{w d \rho}{\mu} < 2320. \quad (3)$$

В уравнениях обозначены:  $p$  — парциальное давление диффундирующего компонента;  $\tau$  — время диффузии, которое при равномерном движении может быть выражено как отношение длины диффузионной зоны  $l$ , отождествляемой с длиной факела, к скорости равномерного движения факела  $w_{\text{ф}}$

$$\tau = \frac{l}{w_{\text{ф}}};$$

$K$  — коэффициент диффузии компонента смеси;

$x$  — текущая линейная координата, имеющая в данном случае смысл толщины диффузионного слоя;

$w_{\text{газ.}}$  — скорость истечения газа;

$w_{\text{возд.}}$  — тоже воздуха;

$d$  — диаметр круглой горелки или приведенный диаметр плоскощелевой или иной формы горелки;

$\rho$  — плотность потока;

$\mu$  — вязкость потока.

Выполненные автором исследования по сжиганию светильного и водяного газов в условиях открытых атмосферных горелок щелевых и концентрических, а также в экранированной топочной камере, показали, что действительно достигаемая длина факела диффузионного пламени составляет 0,75–0,85 от рассчитанной, вследствие искривления прямолинейного пути факела благодаря влиянию температурного поля [3].

Регулирование длины факела диффузионного горения в большей степени зависит от толщины диффузионных газовых и воздушных потоков, определяемой геометрическими размерами горелки, и в меньшей, и даже очень малой степени, — от начальной скорости истечения потоков. Влияние состава горючего газа на длину и температуру факела пламени сказывается через коэффициенты диффузии компонентов, входящих в газовую смесь. Чем больше в газе водорода, тем короче факел; чем больше в газе метана, тем длиннее факел. При сжигании газа, содержащего значительные количества углеводородов (например, светильный\*), коксовый газы), диффузионный факел обладает большой светимостью вследствие термического разложения углеводородов с выделением углерода в тонкодис-

\*) Автором выполнено экспериментальное исследование влияния подогрева газа и воздуха и изменения угла встречи газового и воздушного потоков на длину факела и распределение температуры по длине факела, а также выявлены условия, при которых факел отрывается от устья горелки и устойчиво горит на некотором расстоянии от нее [11]

персном состоянии; степень черноты пламени довольно высокая, порядка 0,4—0,45 от степени черноты абсолютно черного излучения. Область практического применения диффузионного горения и преимущества его довольно подробно описаны в статье Хелборна [4].

Второй формой сжигания газов является факельное турбулентно-диффузионное горение, наиболее распространенное в практике. При организации этого вида сжигания смешение газа и воздуха производится частично в горелке (первичный воздух), частично в рабочем пространстве топки, печи. Факторами, влияющими на степень смешения и длину факела, являются: а) неодинаковые скорости истечения потоков; б) направление потоков под большим или меньшим углом; в) применение искусственных турбулизаторов. Длина факела пламени и распределение температуры в факеле не поддаются точному предварительному расчету, хотя довольно успешные попытки в этом направлении имеются [5, 6, 7, 8, 9, 10].

Третьей формой горения газов является поверхностное каталитическое беспламенное горение; это горение характеризуется следующим: а) газ и воздух перед поступлением их в горелку предварительно тщательно смешиваются до состояния однородной смеси; б) 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.

Указанные три формы горения газов могут переходить одна в другую при наличии соответствующих условий; для того чтобы проследить за превращением одних форм горения в другие, примем в качестве исходной формы факельное турбулентно-диффузионное горение, осуществив его в простой инжекционной горелке, например, в горелке Бунзена. Пусть через такую горелку подается однородная горючая смесь с количеством воздуха меньшим, чем требуется по стехиометрическим соотношениям, тогда воздух в горячей смеси будет играть роль первичного, а остальное количество воздуха, необходимое для полного горения газа (вторичного), подводится к факелу из окружающей среды. При этих условиях образуется двухконусный факел пламени (позиция 1, рис. 1).

Если газ и первичный воздух достаточно хорошо перемешаны, то внутренний, т. н. „синий“ конус имеет строго очерченный контур, поверхность его является первым, внутренним фронтом пламени. В этом фронте сгорает большая или меньшая часть газа, в зависимости от количества первичного воздуха. Внешний конус не имеет строго очерченного контура, поверхность его является вторым фронтом пламени, в котором сгорает оставшая часть газа за счет диффузии вторичного воздуха из окружающей среды.

Если увеличивать скорость истечения горючей смеси путем увеличения расхода ее при том же составе, то увеличивается высота внутреннего „синего“ конуса, изменяются также высота и очертание внешнего конуса (позиция 2, рис. 1).

Если будем уменьшать количество первичного воздуха в горючей смеси, оставив расход газа прежним, как и в позиции 1-й, то высоты конусов будут увеличиваться, пламя вытягивается (позиция 3, рис. 1). Это происходит вследствие уменьшения скорости распространения пламени. Уменьшение же скорости распространения пламени объясняется обеднением горючей смеси кислородом воздуха, что находится в соответствии с эк-

спериментальными данными Ле-Шателье [12] и Михельсона [13], исследовавшими скорость распространения пламени в зависимости от состава горючей смеси. Если прекратить доступ в горелку первичного воздуха, сохранив турбулентный режим истечения газа, тогда внутренний конус

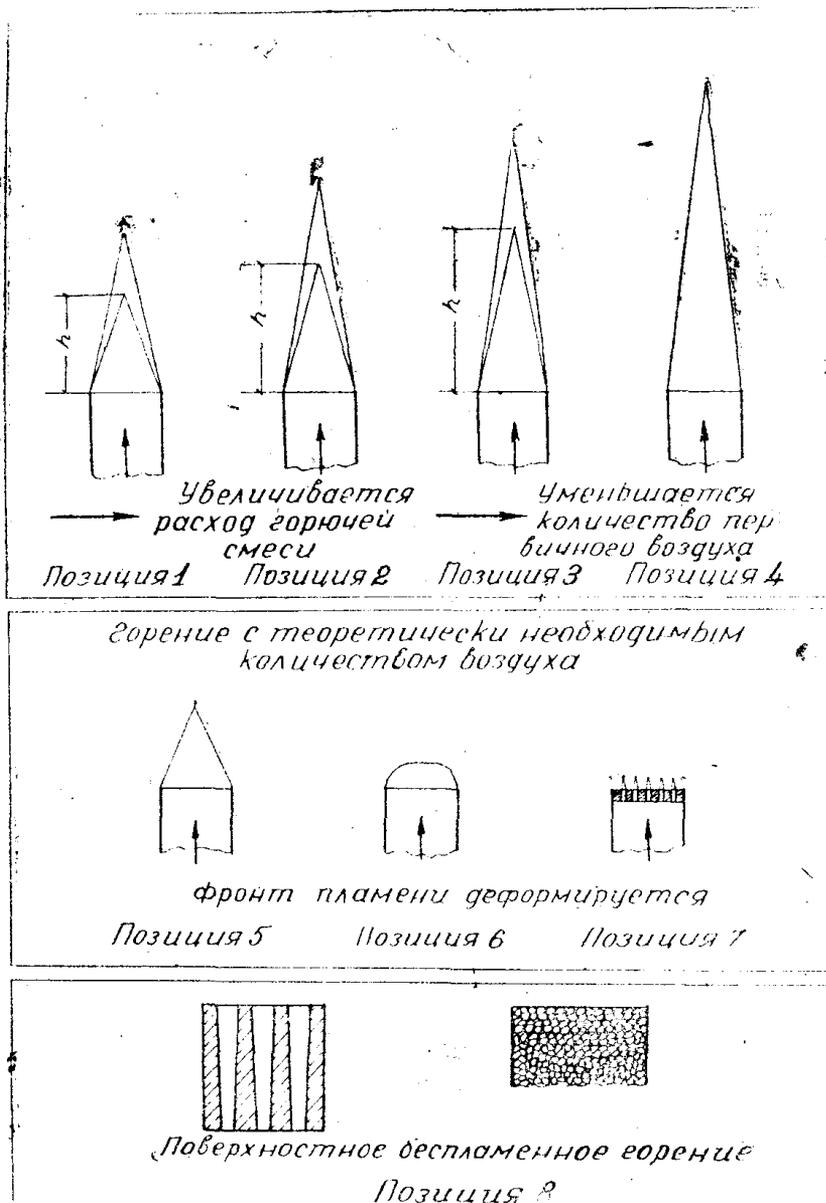


Рис. 1. Схема превращения факельного горения в поверхностное беспламенное горение

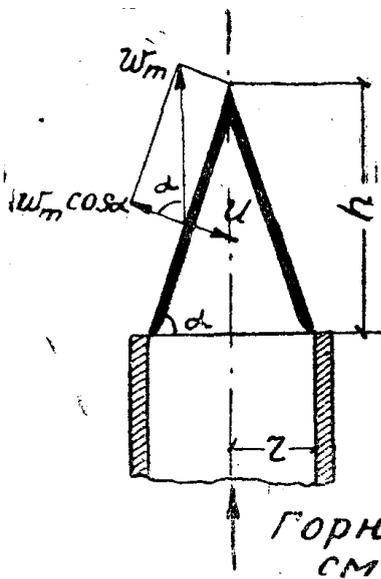
исчезнет, а внешний конус будет иметь наибольшую длину при данной средней скорости истечения (позиция 4, рис. 1).

Будем увеличивать количество воздуха в горючей смеси по сравнению с позицией 1 и доведем до теоретически необходимого для полного горения, тогда двухконусный факел превратится в одноконусный (позиция 5). Так как скорость распространения пламени является наибольшей при стехиометрическом соотношении между горючим газом и воздухом, то высота конуса при данной средней скорости истечения будет минимальной. Дальнейшее увеличение расхода горючей смеси с теоретически необхо-

димым количеством воздуха влечет за собой деформацию конического фронта пламени в эллиптический вследствие изменения эпюры скоростей при значительных числах  $Re$  (позиция 6). Турбулентное пламя отличается от ламинарного тем, что в отличие от ламинарного слышен громкий свист, фронт пламени не является остро очерченным, а расплывчатым, и иногда верхняя часть пламени значительно шире, чем основание [14]. Если теперь в трубку горелки вставить решетку (металлическую или огнеупорную), то бывший ранее одиночный конус пламени разбивается на ряд элементарных конусов над каждым отверстием решетки горелки (позиция 7). Регулированием скорости истечения можно достигнуть проникновения пламени внутрь решетки и тогда горение становится поверхностным (беспламенным), которое осуществляется преимущественно с помощью каналовых огнеупорных или слоевых зернистых огнеупорных горелок (позиция 8).

### III. Деформация нормального фронта пламени в процессе поверхностного горения

При поверхностном горении фронт пламени, в отличие от факельного процесса, значительно деформируется под влиянием гидродинамических, тепловых, каталитических и др. явлений. Как известно, устойчивость конического фронта пламени при факельном горении определяется по Михельсону [13] уравнениями:



$$\cos \alpha = \frac{u}{w_m} \quad (4)$$

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

В этих уравнениях обозначены:  $\alpha$  — угол между образующей конуса и радиусом основания;  $u$  — скорость распространения пламени;  $w_m$  — средняя по сечению скорость истечения горючей смеси, равная секундному расходу горючей смеси, деленному на площадь поперечного сечения трубки (горелки);  $h$  — высота конуса;  $r$  — радиус трубки (горелки) (рис. 2).

Рис. 2. Схема нормального конического фронта пламени

Уравнения (4) и (5) действительны при условии ламинарного истечения, когда имеет место параболическая эпюра скоростей по сечению, а также при образовании фронта пламени правильной конической формы. При этих условиях экспериментально определяется  $u$  — скорость распространения пламени путем измерения угла  $\alpha$  или высота конуса по методу, известному под названием „динамический метод“ [13, 15, 16].

Для нормального конического фронта пламени характерно отношение

$$\frac{u}{w_m} = \text{const} = \cos \alpha \quad (4')$$

По сечению горелки скорость истечения изменяется от  $w = 0$  до  $w = w_{\text{max}}$ , достигая максимума на оси трубы; следовательно, в таком же

соотношении изменяется и величина  $u$ , угол же  $\alpha$  остается неизменным. Но даже при ламинарном режиме истечения происходит некоторое искажение правильной геометрической формы фронта пламени, поэтому правильнее производить измерения угла  $\alpha$  не по всей поверхности конуса, а в такой точке, где действительная скорость истечения равна средней скорости; эта точка может быть определена из следующих соображений: по Гаген-Пуазейлю расход при ламинарном истечении определяется из уравнения

$$V = \frac{\pi}{8\mu} \cdot \frac{\Delta p}{\Delta l} r^4, \quad (6)$$

средняя скорость по сечению

$$\omega_m = \frac{V}{\pi r^2} = \frac{\Delta p}{\Delta l} \cdot \frac{r^2}{8\mu}, \quad (7)$$

скорость в любой точке эюры скоростей

$$\omega_i = \frac{1}{4\mu} \cdot \frac{\Delta p}{\Delta l} (r^2 - x^2). \quad (8)$$

Сравнивая (7) и (8) уравнения и решая относительно  $x$ , найдем

$$\begin{aligned} \omega_m &= \omega_i, \\ x &= \frac{r}{\sqrt{2}} = 0.707r, \end{aligned} \quad (9)$$

т. е. скорость потока в точке  $x$ , находящейся на расстоянии  $0.707 r$  от оси, равна средней скорости истечения.

В вышеприведенных уравнениях обозначены:  $V$  — секундный расход горючей смеси;  $\frac{\Delta p}{\Delta l}$  — градиент давления;  $\mu$  — вязкость потока;  $x$  — переменный радиус трубки (горелки).

В соответствии с уравнениями (4) и (5) при большой скорости распространения пламени высота конуса, угол наклона образующей и поверхность конуса уменьшаются, что влечет за собою сгорание смеси в меньшем объеме. Увеличение скорости распространения пламени достигается увеличением температуры процесса горения, предварительным нагреванием горючей смеси и каталитическим воздействием поверхности горелки. В этом заключается одна из причин, влияющих на деформацию нормального фронта пламени при переходе от обычного пламенного горения к поверхностному беспламенному горению.

Во избежание нарушения устойчивости процесса горения необходимо увеличивать скорость истечения горючей смеси, так как в пределе при  $\omega_m = u$  будет прострел пламени, но увеличение скорости истечения влечет за собой переход от ламинарного режима к турбулентному. При турбулентном же режиме с увеличением числа  $Re$  эюры скоростей изменяет параболическую форму на другую, более плоскую, с менее выраженным максимумом по оси трубы; так, по опытным данным [17], при значении числа  $Re = 50000$  скорость струи на расстоянии  $0.9 r$  от оси трубы составляет  $0.72 \omega_m$ , при числе  $Re = 200000$  скорость струи на том же расстоянии составляет  $0.75 \omega_m$  и при числе  $Re = 800000$  скорость струи —  $0,8 \omega_m$ , в то время как при ламинарном движении скорость струи на том же расстоянии от оси трубы составляет всего лишь  $0.22 \omega_m$ . В связи с изменением эюры скоростей при больших числах  $Re$  происходит сплющивание (деформация) конического фронта пламени.

Следует отметить, что вследствие выравнивания эпюры скоростей по сечению потока происходит также выравнивание скорости распространения пламени по фронту пламени.

В практике поверхностное беспламенное горение осуществляется с помощью каналовых горелок с каналами малого диаметра, в зернистом слое, в пористых плитках, диафрагмах и т. д.; над отверстием каждой поры, канала и т. п. образуется элементарный конус горения. Не лишена интереса такая постановка вопроса: как изменится суммарная боковая поверхность всех элементарных конусов горения по сравнению с поверхностью одиночного конуса, если в обоих случаях радиус горелки и скорости истечения одинаковы? Поверхность  $S$  одиночного конуса над отверстием горелки радиуса  $r$ , высоту  $h$  будет

$$S = \pi r \sqrt{h^2 + r^2} \quad (10)$$

Выразив высоту конуса  $h$  через радиус отверстия в горелке  $r$ , среднюю скорость истечения  $w_m$  и скорость распространения пламени  $u$ , согласно уравнению (5), получим другое уравнение для определения поверхности одиночного конуса  $S$

$$S = 3.14 \cdot r^2 \frac{w_m}{u} \quad (11)$$

Если в отверстие горелки вставить решетку или заполнить зернистым слоем из зерен диаметром  $d$ , то число конусов горения  $N$ , равное числу элементарных отверстий или пор, определится из уравнения

$$N = \frac{\pi r^2}{f} \eta \quad (12)$$

Здесь  $\eta$ —относительное живое сечение зернистого слоя или решетки,  $f$ —площадь сечения элементарной поры.

Для зернистого слоя по Слихтеру [18] относительное живое сечение зернистого слоя  $\eta$  и площадь сечения элементарной поры приближенно могут быть определены из уравнений

$$\eta = 1 - \frac{\pi}{4 \sin \Theta} \quad (13)$$

$$f = 0.0369 d^2 \quad (14)$$

Здесь  $\Theta$ —угол между линиями, проведенными через центры смежных зерен, принимаемых за шары. При наиболее плотном расположении зерен (шаров)  $\Theta = 60^\circ$ , тогда

$$\eta = 1 - \frac{\pi}{4 \sin 60^\circ} = 0.0921.$$

Подставив значение  $\eta$  и  $f$  в уравнение (12), получим

$$N = \frac{\pi r^2}{0.0369 d^2} \cdot 0.0921 = 7.85 \frac{r^2}{d^2} \quad (15)$$

Допустив приближенно сечение поры круглым, определим радиус поры  $r'$

$$r' = \sqrt{\frac{f}{\pi}} = \sqrt{\frac{0.0369 \cdot d^2}{3.14}} = 0.1085 \cdot d \quad (16)$$

и поверхность  $s'$  элементарного конуса высотой  $h'$

$$s' = \pi r' \sqrt{h'^2 + r'^2}.$$

Тогда боковая поверхность  $S'$  всех элементарных конусов горения радиусами  $r'$  и высотой  $h'$  будет равна

$$S' = Ns' = 7.85 \frac{r^2}{d^2} \cdot \pi r' \sqrt{h'^2 + r'^2}.$$

Подставив значение  $r'$  из (16), будем иметь

$$S' = 2.67 \frac{r^2}{d} \sqrt{h'^2 + 0.01175 d^2}. \quad (17)$$

Высота элементарного недеформированного конуса по уравнению (5)

$$h' = r' \sqrt{\frac{w_m'^2}{u'^2} - 1}.$$

Подставив  $h'$  и  $r'$  в уравнение (17), получим

$$S' = 0.29 r^2 \frac{w_m'}{u'}. \quad (18)$$

Сравнивая величину суммарной боковой поверхности элементарных конусов, образовавшихся в слое горелки радиуса  $r$ , с боковой поверхностью одиночного конуса в той же горелке, и приняв во внимание, что для устойчивого процесса горения в обоих случаях должны быть одинаковыми отношения

$$\frac{w_m}{u} = \frac{w_m'}{u'},$$

получим

$$\frac{S'}{S} = \frac{0.29 r^2 \frac{w_m'}{u'}}{3.14 r^2 \frac{w_m}{u}} = 0.092. \quad (19)$$

Из этого следует, что деформация поверхности горения влечет за собою сосредоточение тепловыделения на меньшей поверхности, хотя расход горючей смеси через слой, несомненно, должен быть большим, так как значительно увеличивается скорость распространения пламени в слое, что должно вызвать также и значительное увеличение средней расходной скорости горючей смеси. Затем, поверхность фронта пламени имеет определенную толщину; по одну сторону поверхности фронта, обращенную по направлению к устью горелки, располагается невоспламененная горючая смесь и по другую сторону — нагретые до высокой температуры продукты горения. Поверхность горения представляет собой зону химической реакции, внутри которой и совершается процесс горения. Эта толщина поверхности горения, насколько известно, экспериментально не определялась, но можно рассчитать ее, исходя из кинетических уравнений скорости реакции горения. Например, при горении водорода в смеси с воздухом толщина поверхности горения составляет 0.11 мм [19]; при горении водорода в воздухе толщина поверхности горения составляет 0.16 мм и при горении окиси углерода в воздухе — 0.3 мм [20]. Если скорость движения горючей смеси через фронт пламени будет порядка 10 м/сек, то время собственно реакции горения будет определяться величиной порядка  $0.5 \cdot 10^{-5}$ – $1.5 \cdot 10^{-5}$  сек. Протяженность реакционной зоны, или, что то же самое, толщина поверхности горения зависит от скорости химической реакции, т. е. от химического состава горючей смеси, от температуры и других кинетических

факторов, среди которых немаловажную роль играет каталитическое действие поверхности огнеупора горелки. При поверхностном беспламенном горении имеются налицо все кинетические факторы, повышающие скорость реакции горения, как-то: интенсивное нагревание горючей смеси под влиянием раскаленной поверхности огнеупора горелки, каталитическое действие ее. Вследствие этого поверхность синего конуса становится исчезающе малой. Это является также одной из причин, вызывающих деформацию нормального фронта пламени.

#### IV. Увеличение скорости распространения пламени при поверхностном беспламенном горении

Строго говоря, понятие о скорости распространения пламени не является вполне определенным, так как методика определения величины этой скорости довольно разнообразна и результаты, получаемые при определении, не всегда согласуются между собою.

В данной работе понятие о скорости распространения пламени применяется в том смысле, как об этом трактуют В. А. Михельсон [13], Н. Н. Семенов [21], [20] [22], [23].

Для того, чтобы составить приблизительное представление о влиянии основных кинетических факторов на скорость распространения пламени в условиях поверхностного горения, ниже обсуждаются некоторые количественные зависимости. Влияние температуры подогрева горючей смеси на скорость распространения пламени может быть выявлено из анализа формулы Зельдовича и Франк-Каменецкого [21]

$$U = \frac{1}{L\gamma_0} \sqrt{2\lambda \frac{C_p^2 \gamma_0}{L} \left(\frac{T_0}{T_2}\right)^2 \left(\frac{n_0}{n_2}\right)^2 \left(\frac{\lambda}{DC_p\gamma}\right) \left(\frac{RT_2}{E}\right)^3 e^{-E/RT_2}} \quad (20)$$

Здесь

$U \frac{\text{см}}{\text{сек}}$  — скорость распространения пламени при постоянном давлении;

$L \frac{\text{кал}}{\text{г}}$  — теплотворная способность горючей смеси;

$\gamma_0 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$  — удельный вес исходной смеси;

$\lambda \frac{\text{кал}}{\text{см сек г}}$  — коэффициент теплопроводности продуктов реакций при  $T_2$ ;

$C_p \frac{\text{кал}}{\text{г град}}$  — теплоемкость продуктов горения;

$T_0 \text{ } ^\circ\text{K}$  — начальная температура горючей смеси;

$T_2 \text{ } ^\circ\text{K}$  — теоретическая температура горения;

$n_0$  — число молей исходного вещества по стехиометрическому ур-нию реакции;

$n_2$  — тоже продуктов реакции;

$D \frac{\text{см}^2}{\text{сек}}$  — коэффициент диффузии реагирующего вещества в продуктах реакции;

$R \frac{\text{кал}}{\text{моль}}$  — газовая постоянная;

$E \frac{\text{кал}}{\text{моль}}$  — энергия активации химической реакции.

Объединив все физические постоянные для горючей смеси данного состава в одну величину  $K$  и не учитывая для простоты изменяемость их от начальной температуры, перепишем уравнение (20) в форме, дающей возможность установить непосредственную зависимость между начальной температурой  $T_0$  и скоростью распространения пламени:

$$u = K \left( \frac{T_0}{T_2} \right) \left( \frac{RT_2}{E} \right)^{3/2} \sqrt{\frac{1}{e^{E/RT_2}}} \quad (21)$$

При изменении начальной температуры горючей смеси до  $T_0'$  и, следовательно,  $T_2'$  скорость распространения пламени будет  $u'$  и соотношение между  $u$  и  $u'$  может быть выражено

$$\frac{u'}{u} = \left( \frac{T_0'}{T_2'} \cdot \frac{T_2}{T_0} \right) \left( \frac{T_2'}{T_2} \right)^{3/2} \sqrt{e^{\frac{E}{R} \left( \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_2'} \right)}} \quad (22)$$

В качестве примера возьмем горючую смесь окись углерода—воздух, при  $T_0 = 273 + 15 = 288^\circ\text{K}$ ; теоретическая температура горения будет  $T_2 = 2500 + 273 = 2773^\circ\text{K}$ . При подогреве горючей смеси до  $500^\circ\text{C}$  —  $T_0' = 773^\circ\text{K}$  и  $T_2' = 3173^\circ\text{K}$ . Взяв значение газовой постоянной  $R = 1.985 \frac{\text{ккал}}{\text{моль}}$  и энергию активации  $E = 34000 \frac{\text{ккал}}{\text{моль}}$  и подставив их в уравнение (22), получим отношение скоростей распространения пламени:

$$\frac{u'}{u} = \left( \frac{773}{3173} \cdot \frac{2773}{288} \right) \cdot \left( \frac{3173}{2773} \right)^{3/2} \sqrt{\frac{34000}{1.985} \left( \frac{1}{2773} - \frac{1}{3173} \right)} = 2.9,$$

т. е. скорость распространения пламени в предварительно подогретой до  $500^\circ\text{C}$  горючей смеси увеличивается приблизительно в 3 раза, по сравнению с таковой при начальной температуре  $15^\circ\text{C}$ . Исследуем уравнение (20) на влияние уменьшения энергии активации вследствие каталитического действия раскаленной поверхности огнеупорного материала на скорость распространения пламени. При различных значениях  $E$  и прочих равных условиях соотношение между скоростями распространения пламени выразится в виде

$$\frac{u'}{u} = \frac{E}{E'} \sqrt{e^{\frac{1}{RT_2} (E - E')}} \quad (23)$$

Не располагая экспериментальным материалом по определению  $E$  при воздействии раскаленной огнеупорной поверхности, предположим, что энергия активации уменьшается в 2 раза, что, вероятно, вполне допустимо, если учесть, что температура воспламенения горючей смеси значительно снижается. Тогда для предыдущего примера, т. е. для горючей смеси окись углерода—воздух, отношение скоростей распространения пламени будет

$$\frac{u'}{u} = \frac{34000}{17000} \sqrt{e^{\frac{1}{1.985 \cdot 3173} (34000 - 17000)}} = 7.7,$$

т. е. скорость распространения пламени увеличивается приблизительно в 8 раз под влиянием каталитического действия раскаленной поверхности горелки.

При беспламенном горении необходимы высокие скорости истечения горючей смеси. Но при больших скоростях истечения и сильной турбулентности скорость распространения пламени значительно увеличивается по сравнению с таковой же при ламинарном истечении. Экспериментально определено [14], что при турбулентном режиме истечения скорость рас-

пространения пламени увеличивается приблизительно пропорционально  $\sqrt{Re}$ , например, при  $Re = 4000$  —

$$\frac{\text{и турб.}}{\text{и лам.}} = 2.9$$

и при  $Re = 23300$  — это отношение составляет

$$\frac{\text{и турб.}}{\text{и лам.}} = 5.95.$$

Если принять значение  $Re = 23300$ , т. е. величину сравнительно небольшую, и в соответствии с этим повышение скорости распространения пламени вследствие влияния турбуленции оценить величиною порядка 6, то общее увеличение скорости распространения пламени в условиях поверхностного горения выразится величинами порядка: а) без учета каталитического влияния раскаленной поверхности огнеупорного материала горелки  $3 \cdot 6 = 18$  раз; б) с учетом каталитического влияния раскаленной поверхности огнеупорного материала горелки  $3 \cdot 8 \cdot 6 = 144$  раза.

Применительно к горючей смеси окись углерода—воздух, для которой при обычных условиях факельного горения скорость распространения пламени оценивается величиной 0.6 м/сек, в условиях поверхностного (беспламенного) горения эта величина увеличивается до

$$0.6 \cdot 18 = 10.8 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$$

или

$$0.6 \cdot 144 = 86.4 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$$

Однако, из вышеизложенного не вытекает необходимость делать вывод, что при сравнительно малых скоростях истечения горючей смеси и соответственно малых давлениях невозможно достигнуть устойчивого процесса поверхностного горения. В исследованиях М. Б. Равича [1] давление горючей смеси находилось в пределах 50—100 мм. в. с. и поверхностное горение было устойчивым в течение длительного времени. В опытах Сигова [25] давление горючей смеси также не превышало 150 мм в. с. В опытах автора, результаты которых приводятся ниже, давление горючей смеси светильный газ-воздух не превышало 100 мм в. с., и при сжигании горючей смеси водяной газ—воздух давление было порядка 100—150 мм в. с. Соответствующим подбором длины каналов в канальных горелках и толщины слоя в зернистых горелках можно достигнуть устойчивого поверхностного горения и при малых давлениях горючей смеси.

При поверхностном (беспламенном) горении газа выделяется в единице объема в единицу времени огромные количества тепла, по сравнению с тепловыделением при обычном факельном горении. По опытным данным М. Б. Равича [1], при сжигании московского городского газа в опытной печи, установленной в Энергетическом институте АН СССР, оборудованной канальвыми горелками, достигнута тепловая напряженность порядка  $700 \cdot 10^6 \frac{\text{к кал}}{\text{м}^3 \text{час}}$ , вместо обычно достигаемой при факельном горении тепловой напряженности в  $300000—1000000 \frac{\text{к кал}}{\text{м}^3 \text{час}}$ . Можно считать, что при подборе соответствующих условий (катализаторы, температура) практические пределы теплонапряжения неограничены. Вследствие высокой тепловой напряженности, поверхность горелки нагревается до высокой температуры и становится интенсивным тепловым радиатором.

## V. Условия устойчивости поверхностного горения

Для того, чтобы процесс поверхностного горения был устойчивым, необходимо соблюсти следующие условия: постоянство состава горючей смеси, постоянство температурного режима, постоянство формы и размеров сечений каналов и пор в горелке.

При соблюдении этих условий достигнутое поверхностное горение будет характеризоваться определенными значениями тепловой напряженности и тепловой плотности горения и расходом горючего.

Поддерживать состав горючей смеси постоянным необходимо потому, что при изменении состава изменяется величина скорости распространения пламени, вследствие этого может произойти перераспределение зон по длине канала горелки или по толщине зернистого слоя, влекущее за собой изменение температурного режима.

Требование соблюдения температурного режима в горелке постоянным влечет за собой: а) необходимость динамического равновесия между процессом материального обмена и процессом химического превращения (горения); б) необходимость динамического равновесия между процессом теплового обмена и процессом выделения тепла при горении.

Динамическое равновесие между процессом материального обмена и процессом химического превращения (горения) может быть выражено равенством скорости превращения  $U_n$  и обмена  $U_0$

$$U_n = U_0 \quad (24)$$

или

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} = - \operatorname{div} (\omega_n c) + \operatorname{div} (D \operatorname{grad} C) \quad (25)$$

Здесь  $\frac{\partial c}{\partial \tau} = U_n \frac{\text{моль}}{\text{м}^3 \text{сек}}$  — скорость превращения, т. е. количество превращающегося вещества в единице реакционного объема в единицу времени;

$U_0 \frac{\text{моль}}{\text{м}^3 \text{сек}}$  — скорость обмена, т. е. количество смеси, доставляемой путем поточного и диффузионного переноса в единицу времени в единицу реакционного объема;

$\omega_n = \frac{\text{м}}{\text{сек}}$  — нормальная к фронту пламени составляющая средней линейной скорости переноса;

$C \frac{\text{моль}}{\text{м}^3}$  — концентрация горючего в смеси;

$D \frac{\text{м}^2}{\text{сек}}$  — коэффициент диффузии.

Отнесем члены уравнения (25) к единице поверхности, так как характерной геометрической величиной при беспламенном горении является поверхность фронта пламени; затем примем, что диффузионный перенос в условиях поверхностного горения имеет небольшое значение по сравнению с поточным переносом; исключим влияние изменения концентрации горючего на скорость превращения смеси определенного состава, что является допустимым, так как горючая смесь постоянно берется в эквивалентных количествах и необратимо превращается в продукты горения,

тогда величина  $U_n$  приобретает смысл скорости распространения пламени  $\left(\frac{\text{м}^3}{\text{м}^2 \text{сек}}\right)$ , а величина  $U_0$  становится нормальной к фронту пламени составляющей средней скорости движения горючей смеси через фронт пламени.

Таким образом, условием динамического равновесия процессов превращения и материального обмена является равенство скоростей распространения пламени  $U$  и нормальной составляющей средней скорости движения горючей смеси  $w_n$

$$U = w_n \quad (26)$$

Это условие является специфичным для поверхностного (беспламенного) горения, так как при других формах горения, в особенности при факельном ламинарном горении, диффузионный перенос имеет преимущественное значение.

Динамическое равновесие между процессом теплового обмена и процессом выделения тепла при горении может быть выражено уравнением

$$\frac{D}{d\tau} (C_p \rho \theta) - q U_n = Q_0. \quad (27)$$

Из этого уравнения следует, что изменение теплосодержания системы (субстанциональная производная  $\frac{D}{d\tau} (C_p \rho \theta)$ ) зависит от тепловыделения в процессе превращения ( $\pm q U_n$ ) и теплообмена  $Q_0$ .

Но

$$Q_0 = -\text{div} (C_p \rho \theta w) - \text{div} (-\lambda \text{grad} \theta) + Z \quad (28)$$

Здесь  $\text{div} (C_p \rho \theta w)$  — поточный перенос тепла в единице объема,  $\rho$  — плотность,  $\theta$  — температура;  $w$  — скорость потока;  $\text{div} (-\lambda \text{grad} \theta)$  — кондуктивный перенос тепла в единице объема;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности;  $Z$  — радиационный перенос тепла в единице объема.

Так как

$$\frac{D}{d\tau} (C_p \rho \theta) = \frac{\partial}{\partial \tau} (C_p \rho \theta) + w \frac{\partial}{\partial x} (C_p \rho \theta)$$

и для стационарного процесса

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (C_p \rho \theta) = 0,$$

тогда

$$w \frac{\partial}{\partial x} (C_p \rho \theta) = \text{div} (C_p \rho \theta w),$$

$$q U_n = -\text{div} (-\lambda \text{grad} \theta) + Z \quad (29)$$

При постоянном составе горючей смеси и при соблюдении постоянных реакционно-кинетических условий

$$q U_n = \text{const}. \quad (30)$$

Т. к.  $q U_n$  — есть тепловая напряженность горения, то условие (30) означает, что устойчивое поверхностное горение сопровождается постоянным тепловым напряжением объема реакционного пространства.

Из (29) и (30) следует, что

$$-\text{div} (-\lambda \text{grad} \theta) + Z = \text{const}. \quad (31)$$

Это условие может быть выполнено при  $\theta = \text{const}$ , т. е. должен быть постоянным температурный режим. Выясним обстоятельства, от которых

зависит соблюдение постоянного температурного режима в различных зонах горелки поверхностного (беспламенного) горения. В горелке (любой конструкции), предназначенной для беспламенного сжигания газа, можно выделить три зоны: 1) предпламенную подготовительную зону, в которой температура горючей смеси повышается от начальной  $t_0$  до температуры воспламенения  $t_z$ ; 2) реакционную пламенную зону, где температура продуктов горения повышается от температуры воспламенения почти до теоретической температуры горения  $t_{теор.}$ ; 3) послепламенную зону, в которой температура горения снижается до температуры уходящих газов  $t_{ух.г}$ .

Для анализа температурного режима в подготовительной предпламенной зоне примем допущения: а) что в этой зоне, вследствие ничтожно малой скорости химической реакции  $-qU_n = 0$ ; б) что передача тепла от фронта пламени непосредственно к горючей смеси имеет малое значение по сравнению с теплопередачей от нагретых поверхностей канала или зерен слоя. Это допущение вполне уместно, оно вытекает из факта сравнения обычного факельного процесса с поверхностным горением.

При этих допущениях тепловое состояние системы в подготовительной зоне, выполненной в виде цилиндрического канала диаметром  $d_k$  и длиной  $l$ , может быть выражено уравнением

$$\omega \frac{\partial}{\partial x} (C_p \rho \Theta) \frac{\pi d_k^2}{4} x = \alpha (t_n^{п.з.} - t) \pi d_k dx. \quad (32)$$

По этому уравнению теплосодержание горючей смеси в подготовительной зоне объемом  $\frac{\pi d_k^2}{4} dx$  изменяется вследствие теплопередачи от поверхности  $\pi d_k dx$ , ограничивающей данный объем; температура горючей смеси изменяется от  $t_0$  до  $t_z$ , температура поверхности  $t_{пов.}$  имеет среднее значение; коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  имеет значение суммарного коэффициента

$$\alpha = \alpha_k + \alpha_{излуч.},$$

т. е. и вследствие конвекции  $\alpha_k$ , и вследствие излучения  $\alpha_{излуч.}$ . Интегрируя уравнение (32) в пределах  $t|_{t_0}^{t_z}$  и  $x|_{0}^l$  при средних значениях физических констант и скорости, получим

$$l = \frac{t_{пов.} d_k \omega C_p \rho}{4\alpha} \ln \frac{t_{пов.} - t_0}{t_{пов.} - t_z} \quad (33)$$

Если рассчитанное по уравнению (33) значение  $l$  меньше действительной длины канала горелки, то воспламенение горючей смеси произойдет внутри канала, если  $l$  равна действительной длине канала, то воспламенение будет у выходного устья канала горелки.

Для горелки, выполненной в виде зернистого слоя, характерными величинами являются удельная поверхность зернистого слоя  $\sigma \left( \frac{M^2}{M^3} \right)$  и высота слоя  $h$ ; в этом случае тепловое состояние системы в подготовительной зоне может быть выражено уравнением

$$\omega \frac{\partial}{\partial h} (c_p \rho \Theta) = \alpha (t_{пов.} - t) \sigma \quad (34)$$

После интегрирования в пределах  $t|_{t_0}^{t_z}$  и  $h|_{0}^h$  получим высоту слоя в подготовительной зоне—

$$h = \frac{t_{поверхн.} \omega \cdot c_p \cdot \rho}{\alpha \sigma} \ln \frac{t_{поверхн.} - t_0}{t_{поверхн.} - t_z} \quad (35)$$

В соответствии с уравнениями (33) и (35) длина или высота предпламенной подготовительной зоны должна быть вполне определенной; кроме того, разность температур

$$t_{\text{пов.}} - t_z$$

должна быть положительной, т. е.  $t_{\text{пов.}} > t_z$ .

В пламенной реакционной зоне изменение теплосодержания горючей смеси и продуктов горения происходит вследствие тепловыделения в процессе химической реакции горения и теплоотвода путем поточного переноса, кондукции и излучения. Значение теплоотвода путем кондукции и излучения можно учесть, введя понятие о пирометрическом коэффициенте горения  $\eta_{\text{пир.}}$ , показывающем отношение действительной температуры пламени к теоретической

$$\eta_{\text{пир.}} = \frac{t_{\text{плам.}}}{t_{\text{теор.}}}$$

Благодаря кондукции и, главным образом, радиации в момент выделения тепла,  $t_{\text{плам.}} < t_{\text{теор.}}$  и коэффициент  $\eta_{\text{пир.}} < 1$ .

Тепловое состояние в пламенной реакционной зоне может быть выражено уравнением

$$\omega \frac{\partial}{\partial x} (c_p \rho \eta \Theta) = q U_n. \quad (36)$$

Но  $U_n = K_0 e^{-E/RT} f(C_A, C_B, \dots)$ .

Здесь  $K_0$  — предэкспоненциальный множитель, зависящий от химической природы реагирующих веществ и от механизма реакции;  $f(C_A, C_B, \dots)$  — функция концентрации реагирующих веществ, зависящая от механизма реакции.

Для постоянного состава реагирующей горючей смеси в условиях необратимого процесса

$$K_0 f(C_A, C_B, \dots) = \text{const} = K,$$

тогда уравнение (36) примет вид

$$q K e^{-E/RT} = \omega \frac{\partial}{\partial x} (C_p \rho \eta \Theta) \quad (37)$$

Интегрируя это уравнение в пределах от температуры воспламенения  $t_z$  до температуры пламени  $\eta t_{\text{теор.}}$  по длине реакционной зоны при средних значениях физических констант  $\bar{C}_p$ ,  $\bar{\rho}$  и средней скорости движения  $\bar{W}_{cp}$ , получим

$$h = \frac{\bar{\omega}}{qK} \bar{C}_p \bar{\rho} \frac{R}{E} \left( T_z^2 e^{\frac{E}{RT_z}} - \eta^2 T_{\text{теор.}}^2 e^{\frac{E}{R\eta T_{\text{теор.}}}} \right) \quad (38)$$

Точный количественный расчет протяженности  $h$  реакционной зоны трудно выполнить по этому уравнению, вследствие того что значительное число переменных величин принято при интегрировании за средние постоянные, но можно сделать качественные выводы, полезные при обсуждении вопроса об условиях устойчивости реакционной зоны.

Если сравнить первый член в скобке со вторым, то по абсолютной величине первый приблизительно в  $10^5$  раз больше второго; из этого приближенно можно сделать заключение, что на положение реакционной зоны мало влияет теоретическая температура горения и пирометрический коэффициент горения. На устойчивое положение реакционной зоны исключительно большое влияние оказывает отношение  $\frac{E}{T_z}$ . В условиях поверх-

ностного горения величина  $E$  имеет стремление к уменьшению и тем большому, чем активнее катализатор; вследствие этого уменьшается  $h$  — протяженность реакционной зоны.

Таким образом, устойчивость реакционной зоны обусловлена каталитическим действием поверхности материала горелки, так как именно от этого действия зависит величина  $E$  и температура воспламенения  $T_z$  горючей смеси.

В послепламенной зоне температура продуктов горения понижается от  $\eta t_{\text{теор}}$  до  $t_{\text{ух.}}$ , вследствие теплоотдачи на поверхность материала горелки; количество тепла, отдаваемого продуктами горения в послепламенной зоне, зависит от аккумуляции его материалом горелки, от кондуктивной теплоотдачи материала горелки в предпламенную зону и от излучения открытой поверхности горелки в рабочее пространство топки, печи и т. д. При установившемся режиме тепло аккумуляции равно нулю; тепло, передаваемое в предпламенную зону, сравнительно невелико, так как количество его определяется затратой на нагревание горючей смеси от начальной температуры  $t_0$  до температуры воспламенения  $t_z$ . Следовательно, преимущественное влияние на изменение теплосодержания продуктов горения в послепламенной зоне оказывает излучение открытой поверхности горелки; устойчивость процесса горения, зависящая от температурного режима, в послепламенной зоне преимущественно будет определяться величиной открытой поверхности горелки.

Изложенные выше соображения относительно влияния температурного режима на устойчивость поверхностного горения иллюстрированы кривыми на „схеме температурного режима в пределах устойчивого поверхностного горения“ (рис. 3).

Кривые, отмеченные 1, относятся к случаю наиболее устойчивого режима, когда реакционная зона находится внутри канала или слоя горелки; кривые, отмеченные 2, относятся к случаю неустойчивого горения, т. к. небольшие колебания в режиме могут вызвать переход поверхностного горения во взрывное горение в смесителе; кривые, отмеченные 3, относятся к другому случаю неустойчивого горения, т. к. небольшие колебания в режиме могут вызвать переход поверхностного горения в факельное, вне горелки.

Прямая, параллельная оси абсцисс, характеризует условно постоянную температуру воспламенения. Кривые, относящиеся к случаю наиболее устойчивого режима, характеризуют следующие явления: сплошная кривая 1. показывает изменение температуры горючей смеси от начальной  $t_0$ , при

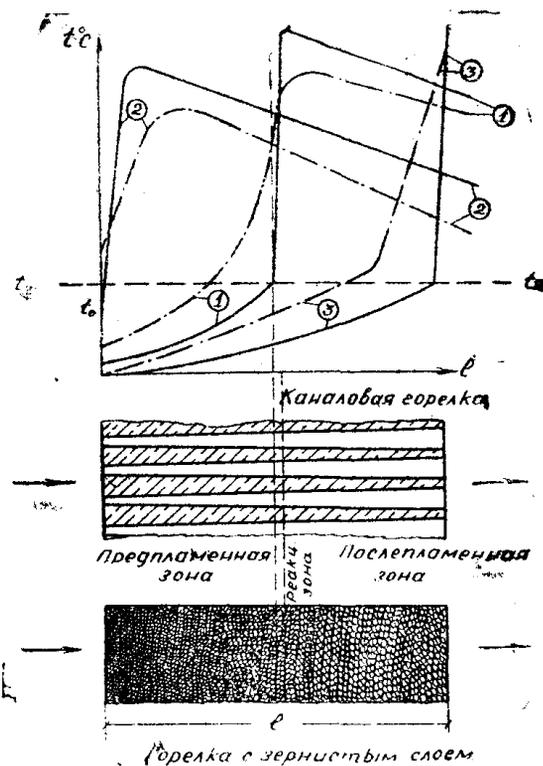


Рис. 3. Схема температурного режима в пределах устойчивого поверхностного горения.

Условные обозначения:

- температура горючей смеси,
- - - - - температура слоя,
- · · · · температура воспламенения.

входе в горелку до конечной  $t_{\text{ух. г.}}$ , при выходе из горелки. Участок горелки в интервале  $(t_0 \div t_z)$  — предпламенная зона. В этой зоне, вследствие теплоотдачи от поверхности канала или слоя горелки, горючая смесь нагревается до температуры воспламенения. В точке пересечения кривой температуры горючей смеси с прямой  $t$  воспламенения происходит почти мгновенно реакция горения.

В реакционной пламенной зоне кривая  $t_0$  горючей смеси резко переходит в кривую температуры пламени  $\eta t_{\text{теор}}$ . В послепламенной зоне температура продуктов горения понижается от  $\eta t_{\text{теор}}$  до  $t_{\text{ух. г.}}$  вследствие теплоотдачи поверхности канала или слоя горелки. Колебания в температурном режиме вблизи кривых устойчивости, т. е. кривых, отмеченных 1, хотя и могут вызвать смещение реакционной зоны в ту или иную сторону и изменить таким образом соотношение между остальными зонами, но поверхностное горение не нарушится. Однако, значительные колебания в температурном режиме могут вызвать смещение реакционной зоны к границам неустойчивого горения 2 или 3, вследствие чего поверхностное горение нарушится и перейдет в иную форму. К причинам, которые могут вызвать нарушение устойчивости поверхностного горения, относятся следующие:

а) изменение соотношения между количеством газа и воздуха в горючей смеси;

б) изменение живого сечения горелки, вызванное засорением каналов и пор в горелке, оплавлением и пр., что повлечет за собой увеличение сопротивления, уменьшение скорости истечения горючей смеси и смещение реакционной зоны к границам неустойчивых режимов;

в) резкое изменение тепловой нагрузки горелки. При резком увеличении тепловой нагрузки, а следовательно, и расхода горючей смеси, произойдет удлинение предпламенной зоны, смещение зоны горения к открытой поверхности горелки и превращение поверхностного горения в факельное.

При резком уменьшении расхода реакционная зона сместится к поверхности входа в горелку и тогда горение может перейти во взрывное в смесителе.

Резюмируя обсуждение вопроса об условиях устойчивости поверхностного горения, можно сказать, что поверхностное горение, являясь наиболее совершенным способом сжигания газа, в то же время требует высокой автоматизации контроля и управления за процессом горения.

## **VI. Экспериментальные исследования условий образования и устойчивого развития поверхностного (беспламенного) горения светильного и водяного газов**

Опытное исследование условий образования и устойчивого развития поверхностного (беспламенного) горения проводится автором в лаборатории тепловой аппаратуры Томского политехнического института.\*) Были поставлены следующие серии опытов: а) поверхностное сжигание светильного газа в зерненном слое в горелке с открытой поверхностью; б) поверхностное сжигание светильного газа в зерненном слое в горелке с водоподогревателем; в) поверхностное сжигание светильного газа в пористых плитках; г) сжигание водяного газа в кварцевых трубках; д) сжигание водяного газа в печи с зерненым слоем.

\*) В разное время в работе принимали участие работники лаборатории: Г. Д. Специ, П. Г. Федотов, В. В. Сигова, А. А. Стариков, Н. Д. Вылегжанин, В. В. Пиотух, Пахтусова.

В опытах применялся для сжигания светильный газ ретортных печей газового завода института. Средний состав газа

$\text{CO}_2$ —4.4%;  $\text{O}_2$ —1.4%;  $\text{CH}_4$ —34.05%;  $\text{N}_2$ —13.10%.  
 $\text{C}_2\text{H}_2$ —1.0%;  $\text{CO}$ —9.0%;  $\text{H}_2$ —35.64%;

Теплотворная способность по калориметру Юнкера в среднем 4254 ккал/м<sup>3</sup>.  
 Водяной газ поступал с завода № 660; его состав

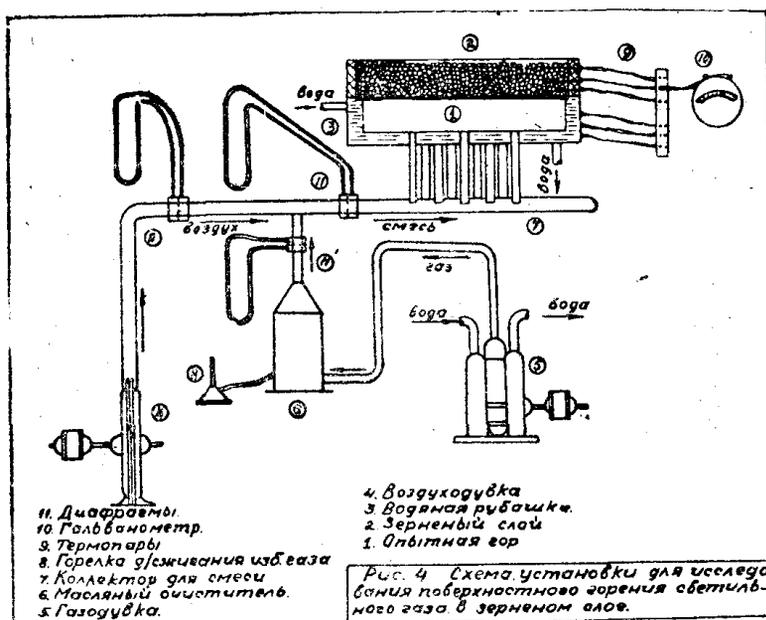
$\text{CO}$ —38%;  $\text{O}_2$ —0.2%;  $\text{N}_2$ —3.3%.  
 $\text{CO}_2$ —5%  $\text{H}_2$ —53.5%;

Теплотворная способность—2470 ккал/м<sup>3</sup>.

Расходы газа и воздуха измерялись тарированными острыми диафрагмами, изготовленными в лаборатории и поставленными в газопроводе и воздухопроводе, с соблюдением соответствующих правил. Газ подавался в опытные установки или непосредственно из сети, или предварительно проходил через газодувку, вследствие чего повышалось давление. Воздух подавался в установки с помощью вентилятора или типа „Сирокко“, или типа „Шиле“.

#### А. Поверхностное (беспламенное) сжигание светильного газа в зерном слое с открытой поверхностью

Схема экспериментальной установки изображена на рис. 4. Светильный газ с помощью газодувки (производительность до 2,8 м<sup>3</sup>/час, мощность мотора 1 квт и число оборотов  $n = 1440$  об/мин.) подавался по газопроводу диаметром  $D_1 = 11$  мм через острую диафрагму  $d_1 = 5$  мм в смеси-



тель. Давление в газопроводе не превышало 100 мм в. с. При регулировании расхода газа избыточный газ сжигался в атмосферной горелке типа Бунзена. Воздух вентилятором подавался в смеситель по трубопроводу диаметром  $D_2 = 50$  мм через острую диафрагму  $d_2 = 27$  мм. Смеситель трубчатый с коническим насадком. После смесителя горючая смесь проходила по трубопроводу диаметром  $D_3 = 25$  мм, через острую диафрагму  $d_3 = 12$  мм. Горючая смесь вводилась в опытную камеру через коллектор,

снабженный 9 патрубками. Камера поверхностного горения имела прямоугольную форму 300 на 330 мм и состояла из 2 частей:

1) нижняя часть камеры для равномерного распределения горючей смеси по сечению; она снабжена водяной рубашкой с непрерывной циркуляцией воды;

2) верхняя часть камеры с сетчатым дном. Общая поверхность дна 0.099 м<sup>2</sup>, живое сечение сетки 0.021 м<sup>2</sup>. Верхняя часть камеры заполнялась слоем из зерен шамотного огнеупорного материала различной высоты слоя и диаметра зерен.

В боковых стенках верхней камеры вставлялись 6 термопар на 3 высотах: 80 мм, 40 мм и 20 мм от уровня поверхности сетки.

Гидравлическое сопротивление слоя шамотовых зерен определялось по формуле

$$\Delta p = \xi \frac{w^2}{2g} \gamma \frac{l}{d} \quad (39)$$

Здесь  $l$  — высота слоя (м);

$d$  — диаметр зерен (м);

$\gamma$  — удельный вес газа (кг/м<sup>3</sup>);

$w$  — скорость движения газа (м/сек); при этом скорость рассчитывается как частное от деления секундного расхода воздуха на живое сечение поверхности зернового слоя, т. е.

$$w = \frac{V}{f} \left( \frac{\text{м}^3}{\text{сек м}^2} \right);$$

$\Delta p$  — падение давления (мм. в. с.);

$\xi$  — коэффициент сопротивления.

Величина этого коэффициента найдена опытным путем для слоя из зерен диаметром 3—5 мм

$$\xi = 29.2.$$

При обработке результатов исследования необходимо знать скорость прохождения горючей смеси через зерновый слой. Скорость прохождения горючей смеси через слой рассчитывалась как отношение секундного объема горючей смеси к живому сечению зернового слоя. Живое сечение

$$f = F \cdot \eta,$$

где  $F$  м<sup>2</sup> — открытая поверхность зернового слоя; в нашем случае  $F = 0.3 \cdot 0.33 = 0.099$  м<sup>2</sup>.

$\eta$  — коэффициент поверхностей пористости; величина его определялась по Слихтеру (уравнение 13).

При наиболее плотном расположении шаров зерен  $\eta = 0.0921$ , следовательно, живое сечение зернового слоя в опытной газосожигательной камере составляло

$$f = 0.099 \cdot 0.0921 = 0.00911 \text{ м}^2.$$

Проведение серии опытов по сжиганию светильного газа в зерновом слое с открытой поверхностью имело целью: а) визуальное наблюдение за превращением факельного горения в поверхностное (беспламенное); б) изучение вопроса об оптимальной высоте и гранулометрическом составе слоя в условиях устойчивого процесса горения; в) изучение вопроса о распределении температуры в слое, тепловой напряженности и тепловой плотности горения.

Наблюдения за превращением факельного горения в поверхностное производились следующим образом: в газосожигательную камеру с насыпан-

ным в нее слоем шамотовых зерен (диаметр зерен 3—5 мм, высота слоя 85 мм) сначала подавался только один газ, затем понемногу добавлялся воздух через смеситель.

При недостатке воздуха для полного горения над слоем образуется колеблющееся пламя неопределенной формы. По мере добавления воздуха внутри пламени появляется внутренний „синий“ конус, который как бы „садится“ на поверхность слоя, затем разбивается на ряд элементарных „синих“ конусов. При достижении в горючей смеси теоретически необходимого количества воздуха элементарные „синие“ конуса „пропадают“; акустически это сопровождается легким треском. Вскоре после того, как элементарные конуса „пропали“, поверхность слоя сильно накаливается. Вставленные в слое термомпары позволяют судить о том месте в слое, где развивается наиболее высокая температура.

Плавное, постепенное увеличение или уменьшение расхода горючей смеси вызывало смещение зоны высоких температур по высоте слоя; при резком изменении расхода смеси обычно происходили хлопки, взрыв горючей смеси в нижней части камеры сжигания, сопровождавшийся выбросом зернового слоя. Иногда взрывы распространялись до смесителя.

По этой причине применявшийся сначала смеситель в виде металлического баллона был заменен трубчатым, инжекторным.

Также было установлено, что водяная рубашка в нижней части газосжигательной камеры не имеет заметного влияния на предотвращение хлопков, поэтому при дальнейших исследованиях вода в рубашку не подавалась.

При изучении вопроса об оптимальной высоте и гранулометрическом составе слоя в качестве критериев для оценки были выбраны следующие: а) равномерный накал поверхности зернового слоя без видимых „синих“ конусов; б) сжигание газа с теоретически необходимым количеством воздуха и в) отсутствие хлопков и местных очагов горения в слое. Характеристика исследованных слоев приведена в табл. 1.

Таблица 1  
Высота и гранулометрический состав зернового шамотного слоя в открытой горелке

№ слоя	Размер зерен мм	Высота слоя мм	Условия горения
I	1—3	13	Накал поверхности неравномерный, частые взрывы. Поверхностное горение неустойчивое.
	3—4	25	
	4—5	5	
	5—6	10	
	6—7	12	
	7—10	15	
		80	
II	1—3	8	Местные очаги горения в слое, накал поверхности неравномерный, частые взрывы.
	3—4	4	
	4—5	5	
	5—6	6	
	6—7	7	
	7—10	10	
		40	

№ слоя	Размер зерен мм	Высота слоя мм	Условия горения
III	1—3	7	То же, но в большей степени, чем во II слое.
	3—4	8	
	4—5	5	
		20	
IV	7—10	80	При изменении расхода горючей смеси—частые хлопки.
V	7—10	40	То же
VI	6—5	80	Сравнительно равномерный накал поверхности.
VII	6—5	40	То же.
VIII	5—4	80	Равномерный накал поверхности, устойчивое беспламенное горение.
IX	5—4	40	То же.
X	4—3	40	То же.
XI	4—3	80	Равномерный накал поверхности, регулирование расхода горючей смеси в широких пределах не нарушает устойчивости беспламенного горения.
XII	2—3	80	То же, но менее равномерный накал.
XIII	3—1	80	Неравномерный накал поверхности.

Из исследованных 13 слоев наиболее подходящим оказался слой № XI, высотой 80 мм с зернами диаметром 3—4 мм. Дальнейшая работа производилась с этим слоем.

Скорость прохождения горючей смеси через слой

$$w_0 = 0.15 \div 0.32 \text{ м/сек.}$$

Порозность слоя, как отношение суммы объемов пор ко всему объему слоя, по Слихтеру [18]

$$m = 1 - \frac{\pi}{6(1 - \cos \theta) \sqrt{1 + 2 \cos \theta}} \quad (40)$$

При наиболее плотном расположении шаров—зерен  $\theta = 60^\circ$  и тогда  $m = 0.2295$ .

Удельная поверхность зернового слоя  $\sigma$ , как отношение суммы поверхностей всех шаров-зерен к объему слоя,—

$$\sigma = 1321 \frac{\text{м}^2}{\text{м}^3}$$

При изучении вопроса о распределении температуры в зерновом слое, тепловой напряженности и тепловой плотности горения изменялся расход газа и воздуха с соблюдением коэффициента избытка воздуха, приблизительно равным единице. Температура измерялась термоэлементами ( $Pt-PtRh$  термодпары), поставленными на высоте 20, 40, 80 мм от уровня поверхности сетки, поддерживающей зерновый слой. Результаты измерений приведены в таблице 2.

Таблица 2

Распределение температуры в зерновом слое, высотой 80 мм из шамотовых зерен  $d=3-4$  мм

Количество		Коэффициент избытка воздуха	Распределение температуры		
Газ м <sup>3</sup> /час.	Воздух м <sup>3</sup> /час.		20 мм	40 мм.	80 мм.
0.775	3.673	1.065	200°C	1000°C	690°C
0.950	4.645	1.015	200°C	1080°C	750°C
1.097	5.625	1.150	200°C	2100°C	800°C
1.344	6.560	1.090	200°C	2750°C	8350°C
1.550	7.580	1.1	400°C	7500°C	8500°C
1.731	8.400	1.09	400°C	7800°C	8750°C
1.731	8.500	1.1	600°C	9500°C	8800°C

При расходе газа от 0.775 м<sup>3</sup>/час до 1.344 м<sup>3</sup>/час горение происходит вблизи наружной открытой поверхности. Если при этом расходе газа считать приблизительно высоту зоны горения равной высоте верхней половины слоя, т. е. 40 мм, то тепловая напряженность зоны горения, отнесенная к объему пор, будет

$$q = \frac{V_{\text{газ}} \cdot Q_{\text{H}}^{\text{P}}}{m V_1},$$

здесь  $V_{\text{газ}}$  — часовой расход газа от 0.775 м<sup>3</sup>/час. до 1.344 м<sup>3</sup>/час.;  $m$  — порозность слоя, равная 0.2295;  $Q_{\text{H}}^{\text{P}}$  — теплотворная способность газа, равная  $4254 \frac{\text{ккал}}{\text{м}^3}$ .  $V_1$  — объем слоя, равный  $0.3 \cdot 0.33 \cdot 0.040 = 0.00396 \text{ м}^3$ ;

$$\begin{aligned} \text{тогда } q &= \frac{0.775 \cdot 4254}{0.2295 \cdot 0.00396} = 3.6 \cdot 10^6 \frac{\text{ккал.}}{\text{м}^3 \text{ час}} \text{ до } \frac{1.334 \cdot 4254}{0.2295 \cdot 0.00198} = \\ &= 6.2 \cdot 10^6 \frac{\text{ккал}}{\text{м}^3 \text{ час}}. \end{aligned}$$

При расходе газа от 1.550 м<sup>3</sup>/час до 1.731 м<sup>3</sup>/час горение происходило в середине слоя. Если при этом расходе газа считать приблизительно высоту зоны горения равной 2/3 высоты слоя, т. е. 53 мм, то тепловая напряженность зоны горения, отнесенная к объему пор, будет от  $5.5 \cdot 10^6$  ккал/м<sup>3</sup>час до  $6.2 \cdot 10^6 \frac{\text{ккал.}}{\text{м}^3 \text{ час}}$

Основным видом теплоотдачи при поверхностном горении является излучение от нагретой поверхности слоя. Расчет теплоотдачи посредством излучения произведен по уравнению

$$Q = C \left[ \left( \frac{T_n}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_0}{100} \right)^4 \right] F \frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \text{час}}$$

Здесь  $C$  — приведенный коэффициент излучения;

$$C = C_{\text{слоя}} = 3.72;$$

$T_n$  — температура открытой поверхности слоя;

$T_0$  — температура окружающей среды;

$F$  — открытая поверхность слоя.

Таблица 3

Теплоотдача от поверхности зернового слоя

Количество			Темпер. по- верх. слоя °C.	Теплов. плотн. горен. ккал м <sup>2</sup> /час	Теплота горения ккал час	Теплоот- дача излуч. ккал час	Теплосодер- жание про- дуктов горен. ккал-час	Доля тепла на излу- чение
Газ м <sup>3</sup> /час	Воздух м <sup>3</sup> /час	Прод. горен. м <sup>3</sup> /час						
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.775	3.673	4.030	690	33·10 <sup>3</sup>	3300	2350	950	0.71
0.950	4.645	4.940	750	40.5·10 <sup>3</sup>	4050	2779	1271	0.68
1.097	5.625	5.700	800	46.7·10 <sup>3</sup>	4670	3088	1582	0.66
1.344	4.560	6.980	835	57.2·10 <sup>3</sup>	5720	3675	2045	0.64
1.550	7.580	8.070	850	6·10 <sup>3</sup>	6600	4195	2405	0.64
1.731	8.400	9.010	875	78.8·10 <sup>3</sup>	7880	5142	2738	0.65
1.731	8.500	9.625	880	78.8·10 <sup>3</sup>	7880	4820	2960	0.62

Результаты расчетов приведены в таблице 3. Там же приведена тепловая плотность горения ккал/м<sup>2</sup>час, условно отнесенная к открытой поверхности слоя, а также теплосодержание продуктов горения, покидающих слой.

Итак, серией опытов по сжиганию светильного газа в зерновом слое с открытой поверхностью доказано:

а) возможность устойчивого поверхностного горения при малых скоростях истечения и малых давлениях;

б) горение концентрируется в порах зернового слоя высотой меньше 80 мм;

в) тепловая напряженность горения порядка от 3·10<sup>6</sup> до 6·10<sup>6</sup> ккал/м<sup>3</sup> час.;

г) теплоотдача путем излучения поверхности зернового слоя составляет в среднем 0.66 от всего, выделившегося при горении, тепла.

Этот способ поверхностного беспламенного горения может быть с успехом применен для муфельных и тигельных печей.

### Б. Поверхностное (беспламенное) горение светильного газа в зерновом слое с водоподогревателем над слоем

Схема экспериментальной установки изображена на рис. 5.

Над круглой горелкой диаметром 130 мм устроена цилиндрическая камера из огнеупорного материала, снабженная сверху металлической коробкой, через которую непрерывно протекала вода. Зерновый слой высотой 80 мм состоял из шамотовых зерен диаметром 3—4 мм.

При исследовании устойчивого процесса горения производились следующие измерения: а) расход светильного газа по перепаду давления в острой диафрагме; б) тоже воздуха; в) температура поверхности слоя;

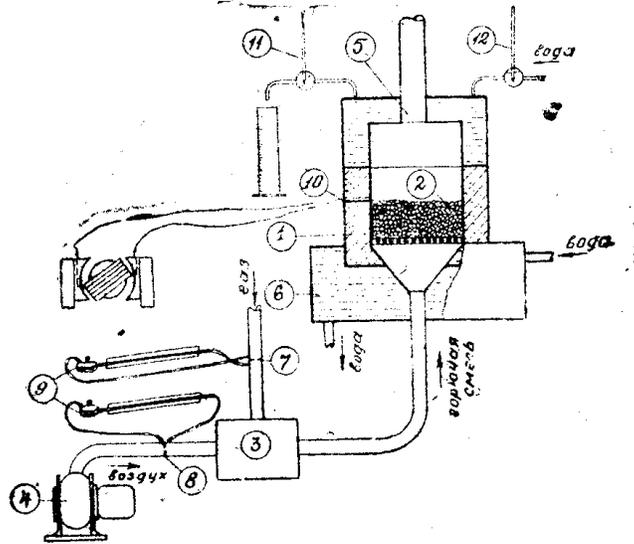


Рис. 5. Схема установки поверхностного сжигания газа в зерненном слое с водоподогревателем.

1—футерованный корпус горелки; 2—зерненный слой; 3—смеситель; 4—воздуходувка; 5—водоподогреватель; 6—водяное охлаждение; 7—диафрагма в газопроводе; 8—диафрагма в воздухопроводе; 9—дифференциальные манометры; 10—термопара; 11 и 12—ртутные термометры.

г) температура воды при входе в водоподогреватель и при выходе из него; д) анализ отходящих продуктов горения.

Результаты измерений представлены в таблице 4.

Таблица 4

Расход газа, воздуха и воды в горелке с зерненым слоем, с водоподогревателем над слоем.

Количество		Коэф. избытка воздуха	Колич. пропущ. воды кг/час	Повыш. темпер. воды $\Delta t^\circ$	Темпер. поверхн. слоя	Состав продуктов горения		
Газ м <sup>3</sup> /час	Воздух м <sup>3</sup> /час					CO <sub>2</sub>	CO	O <sub>2</sub>
0.32	1.54	1.08	4.2	18°	650°	9.45	0.3	0.0%
0.33	1.56	1.06	18.79	54°	710°	9.40	0.4	0.0%
0.42	2.02	1.08	9.40	70.8°	654°	9.50	0.1	0.0%
0.45	2.20	1.10	5.65	76.2°	795°	9.48	0.2	0.0%
0.50	2.42	1.09	18.48	49.2°	783°	9.46	0.2	0.0 <sub>10</sub> %
0.52	2.43	1.05	3.42	73.7°	848°	9.40	0.35	0.0 <sub>10</sub> %
0.63	3.00	1.07	4.20	80.0°	945°	9.50	0.05	0.0 <sub>0</sub> %
0.65	2.90	1.00	18.23	46.9°	811°	9.50	0.06	0.0 <sub>0</sub> %
0.66	3.18	1.08	7.42	90.3°	657°	9.48	0.15	0.0 <sub>10</sub> %
0.67	3.06	1.03	15.70	79.5°	812°	9.44	0.32	0.0 <sub>10</sub> %
0.90	4.40	1.10	14.08	25.7°	960°	9.42	0.36	0.0 <sub>10</sub> %
1.28	6.05	1.06	8.20	74.5°	728°	9.50	0.1	0.0 <sub>10</sub> %

Результаты измерений, помещенные в таблице 4, позволяют сделать следующие выводы:

а) тепловая напряженность горения, отнесенная к объему пор в зерненном слое, составила величину от  $5.6 \cdot 10^6$  до  $22.4 \cdot 10^6$  ккал/м<sup>3</sup> час.

б) тепловая плотность горения, условно отнесенная к открытой поверхности зерненого слоя, диаметром 130 мм, составила величину от  $103 \cdot 10^3$  до  $408 \cdot 10^3$  ккал/м<sup>2</sup> час.

в) тепло, воспринятое водяным экраном, составляет следующую долю от всего тепла, выделившегося при горении (таблица 5).

Таблица 5  
Распределение тепла, выделившегося при горении

Количество выделившегося тепла $V_{\text{газ}} \cdot Q_{\text{н}}^{\text{р}}$ ккал/час	Количество тепла, воспринятое водяным экраном, $G_{\text{воды}} \Delta t$ , ккал/час	Доля тепла, воспринятого тепловым экраном.
0.32 · 4254 = 1360	15.54 · 5	0.75
0.33 · 4254 = 1400	18.79 · 54	0.72
0.42 · 4254 = 1730	18.40 · 70.8	0.73
0.45 · 4254 = 1910	19.30 · 76.2	0.77
0.50 · 4254 = 2127	21.50 · 69.2	0.70
0.52 · 4254 = 2210	21.20 · 73.7	0.71
0.63 · 4254 = 2680	25.20 · 80	0.74
0.65 · 4254 = 2760	43.23 · 46.9	0.73
0.66 · 4254 = 2800	21.42 · 90.3	0.69
0.67 · 4254 = 2850	25.10 · 79.5	0.70
0.90 · 4254 = 3820	30.40 · 85.7	0.68
1.28 · 4254 = 5450	55.50 · 74.5	0.76

Таким образом, доля тепла, воспринятого водяным экраном, составила в среднем величину 0,72; остальное тепло—0,28—потери с уходящими продуктами горения, тепловые потери в окружающую среду.

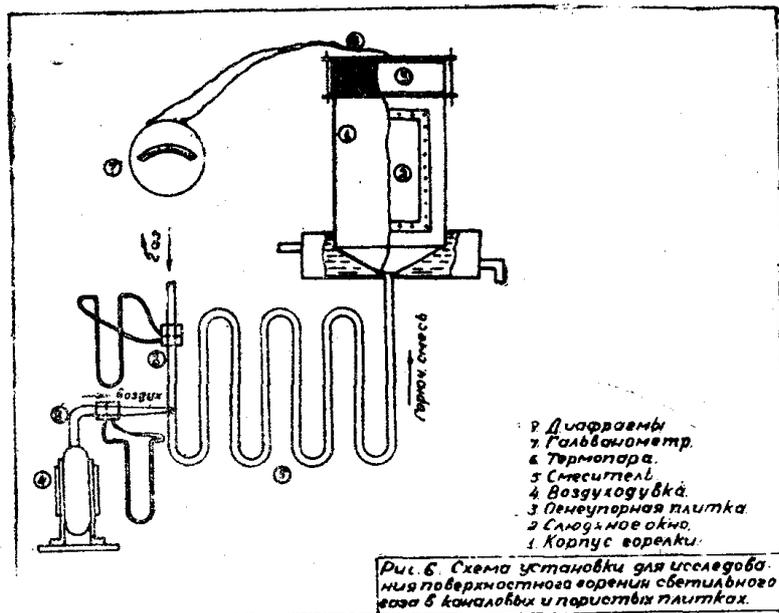
Следовательно, опытами серии Б доказана возможность устойчивого поверхностного (беспламенного) горения в зерненом слое при наличии теплоотдачи к поверхности нагрева. Этот способ может быть использован в различных тепловых аппаратах, применяемых в химической промышленности.

## В. Поверхностное (беспламенное) горение светильного газа в огнеупорных канальных и пористых плитках

Схема экспериментальной установки изображена на рис. 6.

Стальная цилиндрическая горелка. В кожухе цилиндра по высоте вырезаны 2 прямоугольных „окна“, закрытые слюдой, для наблюдения за проскоком пламени. В верху цилиндра устанавливается стальное кольцо, в котором закрепляется канальная огнеупорная плитка диаметром  $r_{\text{см}}$ , равным диаметру цилиндра. Плитки изготовлялись из огнеупорной глины (15 образцов), из огнеупорной массы состава: 65% корунда и 35% глины (11 образцов) и из обожженного магнезита (3 образца). Диаметр всех плиток одинаковый и равнялся 50 мм. Толщина плиток была различной: от 7 до 50 мм. Каналы в плитках были различного диаметра: от 1 до 4,2 мм. Число каналов в плитках от 52 до 495. Кроме плиток с каналами определенного диаметра, были изготовлены пористые плитки путем впрессовывания древесных опилок и последующего выжигания их.

Во время испытаний производились следующие измерения: 1) количество газа и воздуха; 2) температура наружной поверхности плитки; 3) температура внутри цилиндра горелки.



Результаты измерений представлены в таблице 6, в которую внесены измерения не для всех опытов, а лишь для части опытов, характеризовавшихся длительным процессом устойчивого поверхностного горения.

Таблица 6

Характеристика огнеупорной канальной плитки	Количество			Температура поверхности плитки °С.				
	Газ м <sup>3</sup> час	Возд. м <sup>3</sup> час	Козф. избытка возд.					
Материалы	Диаметр плитки мм	Толщ. плитки мм	Диам. каналов мм	Число каналов	Газ м <sup>3</sup> час	Возд. м <sup>3</sup> час	Козф. избытка возд.	Температура поверхности плитки °С.
Смесь . . . . .	50	30	1.5	209	0.54	2.41	1.03	840
65% корунд . . . . .	50	20	2.5	89	0.56	2.50	1.05	760
35% глина . . . . .	50	30	2.5	89	0.56	2.49	1.04	920
Огнеупорная глина . . . . .	50	30	1.5	209	0.46	2.05	1.01	810
	50	33	2.5	89	0.56	2.50	1.00	950
	50	50	4.2	52	0.46	2.06	1.01	890
Обожженный магnezит . . . . .	50	40	2.0	120	0.64	2.85	1.0	840
	50	20	2.0	120	0.64	2.90	1.04	780
Пористая масса из огнеупорной глины . . . . .	50	30	Пористость не определялась		0.63	2.80	1.00	860
Пористая масса из 65% корунда и 35% глины . . . . .	50	30	Пористость не определялась		1.30	5.9	1.04	870
Пористая масса из 93% магнезита и 7% глины . . . . .	50	30	Пористость не определялась		0.65	2.9	1.02	790

Как указано выше, в таблицу 6 включены лишь те опыты, при которых было достигнуто устойчивое, легко регулируемое в течение длительного времени, поверхностное горение при равномерном нагреве поверхности.

На основании данных таблицы 6 скорость прохождения горючей смеси через каналы плиток составила от 1 м/сек. до 2,58 м/сек.

Тепловая напряженность горения, условно отнесенная к объему каналов, составила от  $65 \cdot 10^6$  ккал/м<sup>3</sup> час. до  $235 \cdot 10^6$  ккал/м<sup>3</sup> час.

Тепловая плотность горения, условно отнесенная к наружной поверхности плитки, от  $1 \cdot 10^6$  ккал/м<sup>2</sup> час. до  $3 \cdot 10^6$  ккал/м<sup>2</sup> час.

Непосредственные наблюдения за процессом поверхностного горения с помощью каналовых и пористых плиток дают возможность сделать следующие выводы: а) при одном и том же диаметре каналов в плитках тем более устойчив процесс, чем толще плитка. Наиболее подходящими оказались плитки толщиной 30—40 мм; б) наиболее легко регулируемый процесс горения достигается в пористых плитках.

Опыты, при которых поверхностное горение не было устойчивым, характеризуются следующими данными: а) в плитках толщиной от 7 до 10 мм, с каналами диаметром в 1 мм и числом их 495, не удалось достигнуть устойчивого горения; б) в плитках той же толщины, но с каналами диаметром от 2,5 до 4,2 мм и числом их от 89 до 52, также не удалось достигнуть устойчивого поверхностного горения.

Таким образом, опытами серии В доказана возможность устойчивого поверхностного (беспламенного) горения с помощью каналовых и пористых плиток и выявлены оптимальные соотношения между геометрическими размерами их. Подобного рода метод поверхностного горения может быть применен в ваннах промышленных печей, для нагревания зеркала ванны излучением от поверхности плиток.

### Г. Опыты по сжиганию водяного газа в кварцевой трубке

Как известно, скорость распространения пламени водяного газа значительно больше, чем скорость распространения пламени углеводородных газов, например, коксового или светильного. Так, скорость распространения пламени светильного и коксового выражается величиной 1,6 м/сек., скорость же распространения водяного газа равна 2,8 м/сек. Вследствие этого предварительные опыты по сжиганию водяного газа в зернистом слое сопровождались частыми проскоками пламени в смеситель.

Применявшийся для опытов водяной генераторный газ получается на соседнем с институтом электроламповом заводе № 660 в генераторах системы Пинч из Аралического тощего каменного угля типа полуантрацитов.

Состав влажного, насыщенного при 20°C газа: CO — 37,13%; CO<sub>2</sub> — 4,87%; C<sub>2</sub> — 0,19%; H<sub>2</sub> — 52,3%; H<sub>2</sub>O — 2,3%; N<sub>2</sub> — 3,21%.

Теплотворная способность газа, рассчитанная для этого состава и неоднократно определявшаяся в калориметре Юнкерса как в лаборатории кафедры, так и в лаборатории на заводе № 660

$$Q_H^P = 2470 \frac{\text{ккал}}{\text{м}^3}$$

Удельный вес газа  $\gamma_0 = 0,669$  кг/м<sup>3</sup>.

Для сжигания этого газа с теоретически необходимым количеством требуется воздуха 2,12 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>. Количество образующихся, при этом продуктов горения 2,67 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>.

Калориметрическая температура горения водяного газа (жаропроизводительная способность) при сжигании с теоретически необходимым количеством воздуха в холодном состоянии (температура газа и воздуха около 15—20°C),  $t$  калор. = 2050°C.

Расход газа определялся с помощью нормальной острой диафрагмы, поставленной в газопроводе. Газопровод имеет внутренний диаметр  $D = 15$  мм; диафрагма имеет внутренний диаметр  $d = 7,5$  мм.

Расход воздуха определялся с помощью нормальной диафрагмы, поставленной в воздухопровод. Внутренний диаметр воздухопровода  $D = 25$  мм; внутренний диаметр диафрагмы  $d = 12,5$  мм.

В опытах применялась кварцевая трубка внутреннего диаметра 15 мм, длиной 1100 мм. Поперечное сечение трубки

$$f = \frac{\pi d^2}{4} = 0,785 \cdot (0,015)^2 = 0,000175 \text{ м}^2.$$

В одной серии опытов исследование проводилось с помощью стеклянного инжектора. Водяной газ подавался из сети под давлением, а воздух инжектировался из окружающей атмосферы.

Схема опытов установки изображена на рис. 7.

Газ подавался в инжектор под давлением 218 мм. в. с. в количестве 0,55 м<sup>3</sup>/час. Расход воздуха не измерялся, во всяком случае он был меньше

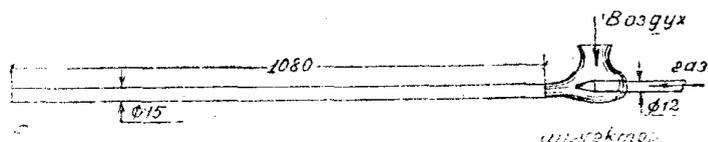


Рис. 7. Сжигание водяного газа в кварцевой трубке

теоретически необходимого для горения т. е. меньше  $0,55 \cdot 2,12$  м<sup>3</sup>/час; значит, количество горючей смеси было меньше 1,72 м<sup>3</sup>/час, в соответствии с чем и скорость прохождения горючей смеси по трубке была меньше, чем

$$\frac{1,72 \cdot 4}{3600 \cdot 3,14 \cdot (0,015)^2} = 2,7 \text{ м/сек.}$$

При этих условиях в пустой кварцевой трубке при пропускании горючей смеси происходил прострел пламени от открытого конца трубки до сопла инжектора. Затем в трубку помещались спирали из медной проволоки на различном расстоянии от конца трубки. Спирали были изготовлены размерами: а) длина 125 мм, диаметр 14 мм, число витков 5; б) длина 70 мм, число витков 20 и в) длина 30 мм, число витков 10.

При помещении проволоки на расстоянии 510 мм от выходного конца трубки (позиция А) пламя простреливает до А и затухает; удержать пламя в позиции А не удалось. При помещении проволоки ближе к выходному концу, на расстоянии 370 мм (позиция В), наблюдалось то же явление т. е. прострел пламени до позиции В и затухание; но при помещении проволоки на расстоянии 220 мм (позиция С) пламя при поджигании простреливает до С и горит устойчиво; происходит локализация пламени в позиции С. Температура наружной поверхности трубки на участке, занятом проволокой длиной 25 мм, повышается до 800—850°С.

При уменьшении давления в сети до 60 мм в. с. спирали на всех позициях простреливались пламенем, и локализовать пламя в трубке не удалось.

Затем были проведены опыты с металлическими сетками, вместо спирали. Сетка (вольфрамовая) закреплялась в обойме в 3 ряда и обойма вставлялась в кварцевую трубку (рис. 8).

При давлении газа в сети 100 мм в. с. и при тех же условиях инжекции воздуха не удалось задержать пламени ни в одной позиции по всей длине кварцевой трубки.

Если у открытого выходного конца трубки постоянно держать поджигающую горелку, то получается периодически повторяющийся прострел пламени. Периодичность прострела 70 раз в минуту. Повидимому, периодичность прострелов следует объяснить длительностью распространения пламени по трубке. Приблизительно длительность распространения пламени выра-

жается в  $\frac{60}{70} = 0,85$  сек., следовательно, скорость распространения пламени при этих условиях приблизительно будет равна:

$$\frac{1.08}{0.85} = 1,28 \text{ м/сек.}$$

При исследовании сжигания водяного газа в кварцевой трубке с принудительной подачей газа и воздуха в смеситель (в отличие от предыдущих опытов, когда воздух инжектировался из атмосферы) было обнаружено, что локализация пламени на металлической сетке происходит при следующем режиме: расход газа 0,935 м<sup>3</sup>/час; расход воздуха от 2,94 м<sup>3</sup>/час до 3,14 м<sup>3</sup>/час; скорость горючей смеси в трубке от 6,15 до 6,45 м/сек

При этом следует отметить, что локализация пламени на сетке получалась не сразу, некоторое время происходили периодические прострелы пламени до сетки. Заподозрив, что причиной периодических прострелов является охлаждающее действие стенок кварцевой трубки и тем большее, чем длиннее расстояние до сетки, в последующих опытах при том же расходе газа сетка была перемещена к выходному концу трубки на расстояние 350—370 мм; при этом число прострелов до локализации пламени значительно сократилось, горение на сетке устанавливалось быстрее. В дальнейшем, чтобы устранить охлаждающее влияние стенок трубки последняя изолировалась асбестовыми цилиндриками, надеваемыми на трубку. При такой изоляции стенок кварцевой трубки локализация пламени при вышеуказанном расходе горючей смеси происходила на сетке на любом расстоянии от выходного конца трубки в любой позиции обоймы с сетками и при том сразу же без предварительных периодических прострелов. Вставленная в изоляцию термopара дала возможность замерять температуру изолированной поверхности кварцевой трубки, эта температура

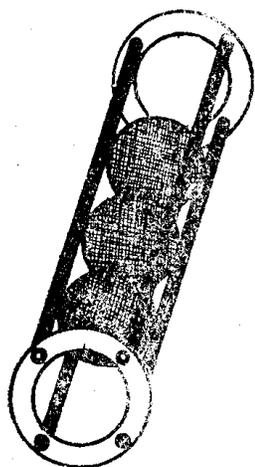


Рис. 8. Вольфрамовая обойма

менялась в пределах от 950 до 1200°С.

При увеличении расхода газа до 1,08 м<sup>3</sup>/час и воздуха до 3,84 м<sup>3</sup>/час, а, следовательно, и скорости горючей смеси в трубке—до 8 м/сек. для локализации пламени на сетке уже не потребовалась изоляция стенок трубки; изолирующие асбестовые цилиндрики были с трубки сняты, и удержание пламени на сетке происходило сразу же в любой позиции по длине кварцевой трубки.

Затем были повторены опыты по сжиганию газа в пустой кварцевой трубке без сетки и без металлических спиралей, но при увеличенном расходе горючей смеси. При расходе газа 2,7 м<sup>3</sup>/час и воздуха 7 м<sup>3</sup>/час и при скорости горючей смеси 15,4 м/сек., пламя задерживалось в трубе на расстоянии 400 мм от выходного конца трубки. При уменьшении или увеличении скорости и расхода локализация пламени происходила на более близком или более далеком расстоянии от выходного конца трубки.

При сжигании водяного газа в кварцевой трубке, заполненной шамотовыми зернами, было обнаружено (трубка заполнялась шамотовыми зернами вплотную, диаметром 3—4 мм, слоем длиной 600 мм, считая от входного конца трубки) (рис. 9):

при расходе газа 0,864 м<sup>3</sup>/час и воздуха 2,22 м<sup>3</sup>/час (коэффициент избытка воздуха 1,2 и скорость смеси 5 м/сек) пламя, подожженное у вы:

ходного конца, останавливалось на короткое время в позиции А, затем простреливало до В, некоторое время задерживалось в В, снова простреливало до С и локализовалось на длительное время. Проскоков пламени в смеситель не наблюдалось. Затем при том же расходе опыт был повторен, но слой шамотных зерен сокращен до 170 мм и перемещен на 300 мм

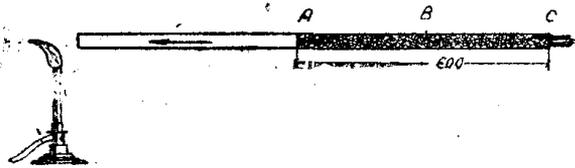


Рис. 9. Сжигание водяного газа в кварцевой трубке с огнеупорными зернами

от входного конца трубки. В этом случае явление повторялось, то есть пламя задерживалось на короткое время в позиции А, затем проскакивало до В, и здесь горение было устойчивым в течение неопределенно долгого времени.

#### Д. Беспламенное сжигание водяного газа в печи малой модели

Печь малой модели имела размеры: внутренний диаметр цилиндра 547 мм, внутренняя высота цилиндра 115 мм, внутренний объем цилиндра

$$\frac{\pi \cdot d^2 h}{4} = \frac{3.14}{4} (0.047)^2 = 0.00173 \text{ м}^3$$

На огнеупорной решетке слоем высотой 10 мм располагались кварцевые зерна, диаметром 3 мм, затем высотой 105 мм магнезитовые зерна, диаметром 3—4 мм. В слоях были помещены пироскопы: внизу—№ 16 (температура плавления 1460°C); в середине № 13 (1380°C) и вверху—№ 12 (1350°C). Расходы газа и воздуха были: газа от 1,7 м<sup>3</sup> до 1,95 м<sup>3</sup> и воздуха от 3.14 м<sup>3</sup>/час до 3.52 м<sup>3</sup>/час (коэффициент избытка воздуха от 0.80 до 0.84). Во время опытов было обнаружено:

- нижний слой кварцевых зерен был вынесен потоком на поверхность, на поверхности кварцевые зерна находились в подвижном состоянии;
- пироскопы так же были вытеснены на поверхность;
- по истечении 1 часа 15 мин. конус № 12 (1350°C) оплавился. Принимая среднее живое сечение слоя равным 0.22, получим: скорость прохождения горючей смеси (в холодном состоянии)—от 3.5 м/сек до 4 м/сек.

Скорость прохождения продуктов горения при измеренной температуре 1350°C составила—19.2 м/сек. до 21 м/сек.

Тепловая напряженность единицы объема (относительно всего объема цилиндра) приблизительно—20.10<sup>6</sup> ккал/м<sup>3</sup> час.

Затем были приведены опыты с зерненным слоем из более крупных зерен.

В печь малой модели помещались магнезитовые зерна, диаметром 6—9 мм, в количестве 250 штук (по счету). Объем зерен составил—0.0000670 м<sup>3</sup>,  
объемная пористость слоя

$$\frac{0.0001955 - 0.0000670}{0.0001955} = 0.66.$$

Расход газа—1.22 м<sup>3</sup>/час.; расход воздуха—2.72 м<sup>3</sup>/час. Коэффициент избытка воздуха—1.04.

В слое были заложены пироскопы: внизу—№ 34 (1750°C); № 35 (1770°C); в середине—№ 28 (1630°C); вверху—№ 27 (1610°C).

Опыт длился около 8 часов. После охлаждения печи оказалось, что конусы № 27 и 28 расплавились, № 34—оглазурился и № 35—остался без видимых изменений. Следовательно, температура в зернистом слое была порядка 1630°—1700°C.

Тепловая напряженность слоя (отнесенная ко всему объему цилиндра) —  $15 \cdot 10^6 \frac{\text{ккал}}{\text{м}^3 \text{ час.}}$

Тепловая напряженность, отнесенная к объему пор составила

$$23.5 \cdot 10^6 \frac{\text{ккал}}{\text{м}^3 \text{ час.}}$$

Принимая среднее живое сечение равным 0.22, получим: скорость прохождения горючей смеси (в холодном состоянии) через слой—2.9 м/сек.

Скорость прохождения через слой продуктов горения, при измеренной температуре  $\frac{1630 + 1700}{2} = 1665^\circ\text{C}$ , будет—14,2 м/сек.

Как было указано выше, опыт длился 8 часов, при этом выноса зерен из слоя не наблюдалось, зерна находились в слое в спокойном состоянии, т. к. кинетическая энергия потока, соответствующая скорости 14.2 м/сек., недостаточна, чтобы преодолеть вес частицы, что подтверждается так же следующим расчетом. Общепринято считать, что в результате взаимодействия силы тяжести и силы сопротивления, по Стоксу, скорость потока, при которой увлекается твердая частица, может быть найдена из уравнения (по Проккату):

$$w_0 = 3.15 \sqrt{d \frac{\gamma_m}{\gamma_2} \left( \frac{\text{м}}{\text{сек}} \right)} \quad (41)$$

здесь  $d$ —диаметр частицы (м), в нашем случае  $d = 0.008$  м;

$\gamma_m$ —удельный (объемный) вес материала, в нашем случае для магнетита  $\gamma = 2600$  кг/м<sup>3</sup>,  $\gamma_2$ —удельный вес газа; в нашем случае, при температуре 1665°C,  $\gamma_2 = 0.184$ ; тогда  $w_0 \approx 33.6$  м/сек, то есть при скорости потока, большей 33.6 м/сек, должен наблюдаться вынос частицы из слоя; так как при описываемых опытах скорость продуктов горения была 20.6 м/сек. и при том не наблюдалось хлопков или взрывов, то и выноса частиц также не происходило.

Затем опыт был повторен, причем магнетитовые зерна были взяты еще больших размеров, а именно—10 мм. Количество зерен (по счету)—250 штук,

Объем зерен составлял 0.00013 м<sup>3</sup>.

При общем объеме печи, равном 0.0001955, объемная пористость составила

$$\frac{0.0001955 - 0.00013}{0.0001955} = 0.34.$$

Примечание: если рассчитать объемную пористость слоя по Слехтеру

$$m = \frac{\pi}{6(1 - \cos \theta) \sqrt{1 + 2 \cos \theta}}$$

то объемной пористости 0.34 соответствует угол расположения шаров-зерен  $\theta = 65^\circ$ .

Удельная поверхность зернистого слоя, как отношение поверхности всех шаровых зерен к объему слоя, выразится

$$\sigma = \frac{N \pi d^2}{\frac{N \pi d^3}{C(1-m)}} = \frac{6(1-m)}{d}$$

$$\sigma = \frac{6(1-0.34)}{0.01} = 384 \text{ м}^2/\text{м}^3.$$

В этом опыте расход газа составил 1 м<sup>3</sup>/час; расход воздуха—2.33 м<sup>3</sup>/час; коэффициент избытка воздуха—1.08.

В слое были заложены пироскопы: внизу № 34 (1750°C), в середине слоя № 28 (1630°C) и вверху № 27 (1610°C); опыт длился около 3 часов, затем был прекращен, ввиду того, что беспламенное горение со всеми характерными признаками было устойчивым. Все конусы оплавилась, следовательно, температура в слое была не ниже 1750°C.

Тепловая напряженность слоя (отнесенная ко всему объему цилиндра)—

$$12.6 \cdot 10^6 \frac{\text{ккал}}{\text{м}^3 \text{час.}}$$

Тепловая напряженность, отнесенная к объему пор, составила

$$37.2 \cdot 10^6 \frac{\text{ккал}}{\text{м}^3 \text{час.}}$$

Тепловая напряженность, отнесенная к поверхности зерен (плотность горения), —  $32,8 \cdot 10^3 \frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \text{час}}$

При среднем живом сечении, равном 0.22, скорость прохождения горючей смеси (в холодном состоянии) через слой—2.45 м/сек.

Скорость прохождения продуктов горения через слой, при измеренной температуре 1750°C,—15.3 м/сек.

При этом беспламенное горение было устойчивым, выноса зерен не наблюдалось.

Пирометрический коэффициент горения, как отношение измеренной температуры к калориметрической температуре горения, составил величину  $\frac{1750}{2050} = 0.85$ .

#### Е. беспламенное сжигание водяного газа в печи увеличенной модели

Печь увеличенной модели имеет размеры: внутренний диаметр цилиндра 90 мм, внутренняя высота слоя зерен 155 мм, внутренний объем цилиндра

$$\frac{\pi d^2 h}{4} = \frac{3.14}{4} \cdot (0.09)^2 \cdot 0.155 = 0.001255 \text{ м}^3.$$

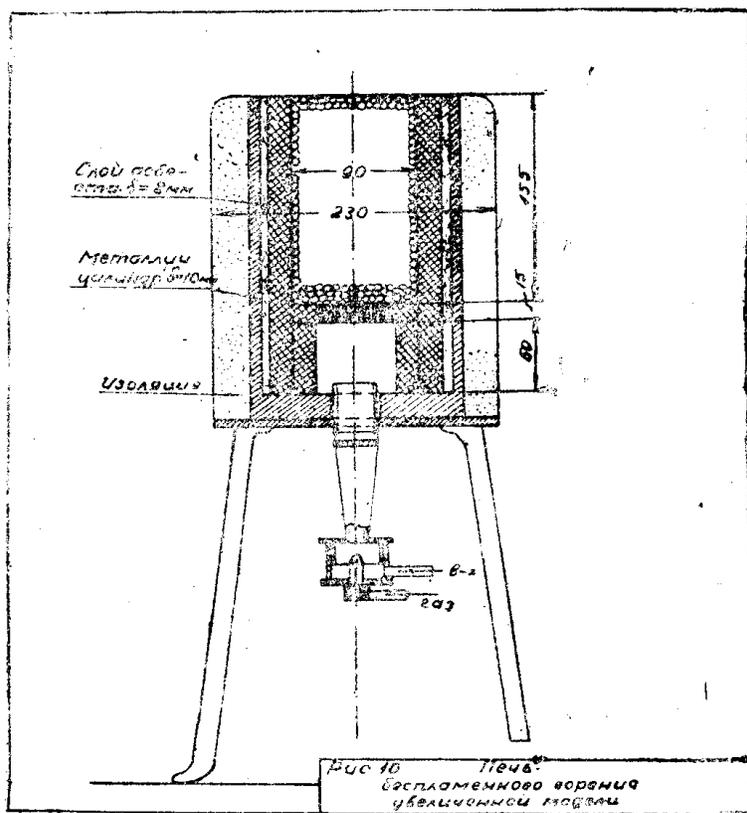
Корпус печи выточен из круглой чугуновой болванки, толщина стен 10 мм; чугуновые стенки изнутри покрыты асбестовой изоляцией, толщиной 8 мм, и магнезитовой огнеупорной замазкой, толщиной 20 мм. Снаружи чугуновые стенки цилиндра покрыты асбестовой изоляцией, толщиной 30 мм. Зернистый слой располагается на огнеупорной решетке, толщиной 15 мм, с отверстиями диаметром 3 мм, число отверстий в решетке—35, следовательно, живое сечение решетки

$$\frac{\pi d_0^2}{4} n = 0.000264 \text{ м}^2$$

Решетка располагается над горелкой на высоте 50 мм, так что между выходным отверстием из горелки и решеткой образуется свободный объем 0.00032 м<sup>3</sup>.

Горелка инжекционного типа: в сопло горелки подавался водяной газ из сети под давлением 500 мм в. с., воздух в горелку нагнетался вентилятором алма под давлением 200 мм в. с. Измерение расхода газа и воздуха производится по перепаду давления в острых диафрагмах. Температура внутри слоя измеряется пироскопами и Pt—PtRh термопарой, а на открытой поверхности зерен—радиационным пирометром типа „Ардометр“. В зернистый слой помещался графитовый тигель, заполнявшийся шихтой для варки стекла. Зернистый слой был из магнезитовых зерен, диаметром 9—10 мм. Схема установки изображена на рис. 10.

Печь разжигается обычным путем, т. е. сначала пускается один газ и снаружи слоя поджигается. Затем постепенно добавляется воздух, пламя „садится“ на поверхность слоя и проникает на некоторую глубину внутри слоя. По мере разогревания слоя количество воздуха увеличивается



и доводится до теоретически необходимого или с небольшим избытком. По истечении 1 час. 30 мин. после пуска газа горение становится с внешней стороны беспламенным—весь зернистый слой раскален, пламя отсутствует. Обычно опыты по расплавлению шихты длились 2—3 часа. В течение всего времени беспламенное горение было совершенно устойчивым, без каких бы то ни было нарушений. Расход газа составлял от 2.76 м<sup>3</sup>/час до 2.86 м<sup>3</sup>/час, расход воздуха от 6.5 м<sup>3</sup>/час до 7 м<sup>3</sup>/час, коэффициент избытка воздуха от 1.09 до 1.14. Внизу слоя над решеткой были заложены пироскопы № 19 (1520°C), в месте установки тигля—термопара. Достигнутая при работе температура: внизу не менее 1500°C (пироскопом расплавился), в месте установки тигля—1480°C, по показаниям термопары, температура на поверхности слоя—1440°C (по показаниям пирометра). В тиг-

ле шихта, состоящая из 80%  $\text{SiO}_2$  и 20%  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , расплавилась, и образовалось стекло.

Тепловая напряженность слоя, отнесенная ко всему объему печи,

$$\text{от } \frac{2470 \cdot 2.76}{0.001255} = 5.45 \cdot 10^6 \text{ ккал/час м}^3$$

$$\text{до } \frac{2470 \cdot 2.86}{0.001255} = 5.83 \cdot 10^6 \text{ ккал/час м}^3.$$

Средняя тепловая напряженность слоя, за вычетом объема зерен и тигля (объемная пористость слоя 0.34, объем тигля 0.00008 м<sup>3</sup>),—

$$\frac{2470 \cdot 2.82}{0.001255 \cdot 0.34 - 0.00008} = 20 \cdot 10^6 \text{ ккал/м}^3\text{час.}$$

Скорость прохождения горючей смеси (в холодном состоянии) через слой, при живом сечении слоя 0.22, составила в среднем

$$\frac{2.82 + 6.75}{3600 \cdot 0.00635 \cdot 0.22} = 1.9 \text{ м/сек.}$$

Скорость прохождения продуктов горения через слой при измеренной температуре 1520°C—10.2 м/сек.

В самом узком месте слоя, там, где был помещен тигель, диаметром 50 мм, при температуре 1480°C скорость продуктов горения была 15.1 м/сек. Выноса зерен из слоя не наблюдалось.

Скорость прохождения горючей смеси через отверстия в решетке, отделяющей зернистый слой от горелки, была

$$\frac{2.82 + 6.75}{3600 \cdot 0.000264} = 10 \text{ м/сек.}$$

### Выводы и заключение

1. В работе сделана попытка—описать механизм поверхностного беспламенного горения газов, исходя из общего представления о горении газов и взаимной превращаемости одних форм горения газов в другие. Изменяя соответствующим образом физические и химические условия, можно достигнуть превращения пламенного горения газов в устойчивый беспламенный поверхностный процесс; наоборот, при нарушении условий устойчивости, беспламенный процесс превращается в факельное пламенное горение.

2. При переходе пламенного факельного горения в беспламенное поверхностное нормальный фронт пламени значительно деформируется; на деформацию нормального фронта пламени оказывают влияние гидродинамические факторы (увеличенная скорость истечения, изменение эпюры скоростей и др.) и физико-химические условия (скорость распространения пламени, каталитическое влияние поверхности, температура и др.).

3. Неизбежное при беспламенном горении увеличение скорости распространения пламени влечет за собою также необходимость увеличения скорости истечения горючей смеси через горелку той или иной конструкции (зернистый слой, поры, каналы и пр.); вследствие этого беспламенное горение концентрируется в малых топочных объемах, создавая этим значительные величины тепловой напряженности  $\left(\frac{\text{ккал}}{\text{м}^3\text{час}}\right)$  и тепловой плотности

горения  $\left(\frac{\text{ккал}}{\text{м}^2\text{час}}\right)$ .

4. Устойчивость беспламенного поверхностного процесса горения определяется условиями термокинетического равновесия в зонах: предпламенной, реакционной и послепламенной, а также соотношением между зонами. Выявлены математические зависимости, позволяющие определять влияние основных физических и химических факторов на размеры отдельных зон в пределах устойчивого беспламенного горения. Также указаны причины, вследствие которых нарушается устойчивость беспламенного процесса горения.

5. В экспериментальной части исследования выполнены в лаборатории шесть серий опытов; в первых трех сериях опытов применялся светильный газ (серии А, Б, В) и в последних трех сериях опытов применялся водяной газ (серии Г, Д, Е).

При сжигании светильного газа беспламенным путем была поставлена цель—организовать устойчивое беспламенное горение при низком давлении газа и воздуха в различных условиях беспламенного сжигания, как-то: сжигание в зернистом слое с открытой поверхностью слоя, сжигание в зернистом слое с водоподогреванием над слоем и сжигание в огнеупорных каналовых и пористых плитках. Поставленная цель достигнута; кроме того выявлены: оптимальная структура зернистого слоя, минимальные размеры каналовых плиток (диаметр каналов, длина их).

При сжигании водяного газа беспламенным путем была поставлена цель—повышение пирометрического коэффициента горения.

В опытах с водяным газом пирометрический коэффициент горения достигал величины 0.85. Одновременно с этим выявлено, что существенным критерием для оценки структуры зернистого слоя является произведение диаметра зерна на удельный вес его. Во избежание нарушения устойчивости беспламенного процесса это произведение должно быть больше критического, иначе вследствие выноса или колебания зерен в слое беспламенный процесс нарушается.

Попутно высказана мысль (лишь предварительно опробованная) о том, что в отличие от существующих методов определения скорости распространения пламени (статического и динамического) может быть предложен метод непрерывных пульсаций; но это предложение является темой специального дополнительного исследования.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. М. Б. Равич.—Поверхностное горение, изд. АН СССР, 1946.
2. *Chaleur et Industrie* 213, 185—190, 1938.
3. Н. Норкин. Диффузионное горение газов. Отчет; реферат опубликован в бюллетене Всесоюзного Химического общества им. Д. И. Менделеева № 4, 1941.
4. W. Hurburn—Diffusion combustion heating reduces shaling loss of steel. *Steel* 10, 25—27, 12, 21—23, 1932.
5. Д. Н. Ляховский и С. Н. Сыркин—Аэродинамика элементарного факела. *Журн. техн. физики* 5, 505—514, 1937.
6. М. А. Кузьмин.—К вопросу о расчете пламенных печей. *Металлург* 9, 46—58, 1934.
7. Д. Н. Ляховский, С. Н. Сыркин—Турбулентная диффузия в факеле. *Советское котлоурбостроение*. 9, 5—8, 1936.
8. Б. А. Шваб.—Связь между температурными и скоростными полями газового факела. *Журн. техн. физики* 5, 431—442, 1941.
9. В. Хейлигенштедт.—Теплотехнические расчеты для конструкции печей и их эксплуатации. Перевод с немецкого 1937.
10. К. В. Вирозуб.—Методика расчета температуры пламени коксовых печей при обогреве доменным газом. *Кокс и химия* 6, 19—21, 1939.
11. Н. Норкин.—Отчет о научно-исследовательской работе (не опубликован), находится в научно-технической библиотеке ТПИ.
12. E. Mallard—et le Chatelier. *Ann. min.* 8, 183.
13. В. А. Михельсон. О нормальной скорости воспламенения гремучих газовых смесей. Собрание сочинения, том 1, 1930.

14. G. Damköhler—Der Einfluss der Turbulenz auf die Flammengeschwindigkeit in Gasgemischen, Ztschr. f. Electroch. u. angew. Physik. Chemie. B. 46, № 11, 1940.
15. G o u y.—Recherches photometriques sur la flammes colorees. Ann. de Chem. et Phys. том 5, № 18, стр. 1—101, 1879.
16. Ubbelohde и A n w a n d t e r. J. f.—Gasbeleuchtung. 225, 1917.
17. Nikuradze.—Цитировано по Гребер и Эрк. Основы учения о теплообмене. Перевод с немецкого, 1936.
18. Slichter.—Цитировано по Лейбензону. Нефтепромышленная механика. ч. II ОНТИ 1934.
19. Nusselt.—ZVDJ 59, 1918.
20. Ribaud.—Chaleur et Industrie 213, 1938.
21. Н. Н. Семенов.—Тепловая теория горения и взрывов. Успехи физических наук. XXIII вып. 3, стр. 251—292, 1940.
22. W. Bone a. Townend.—Flame a. combustion in gases. London. 1927.
23. W. Раушап.—Jnd. a Eng. Chem. 20, 10. 1928.
24. Е. Б. Зельдович, Н. Н. Семенов.—ЖЭТФ, 9—10. 1940.
25. К. А. Сигов.—Сборник научно-исследовательских работ Уральского отделения, ВТИ, вып. 4. 1939.