

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМОВ ТОПОЧНЫХ ПРОСТРАНСТВ СТАЦИОНАРНЫХ И ПАРОВОЗНЫХ КОТЛОВ.

### ВВЕДЕНИЕ.

Весьма важный как для эксплуатации, так и для расчета и конструирования стационарных и паровозных котлов, вопрос об определении объемов топочных пространств остается до настоящего времени не разрешенным. Применяемый в настоящее время способ определения объемов топочных пространств, исходя из полученных опытным путем напряжений топочного объема, отличается значительной неопределенностью, так как рекомендуемые опытные значения напряжений топочного объема колеблются во многих случаях в широких пределах (например, для мазута в стационарных котлах 250000—500000 кал/м<sup>3</sup>час, для углей с большим выходом летучих в паровозных котлах 100—200 кг/м<sup>3</sup>час); причем никаких указаний, какому к.п.д. котла соответствуют рекомендуемые значения напряжений топочного объема, в таблицах напряжений не дается и, таким образом, расчет топки не увязывается со всем тепловым расчетом котла. Между тем на практике приходится встречаться с различной конфигурацией топочных устройств, различными конструкциями топок, разнообразными химическими составами топлива, различными расположениями топок по отношению к поверхностям нагрева котлов, различными избытками воздуха и т. п. факторами, весьма сильно влияющими как на температурный режим топок, так и на весь процесс горения в целом даже для одних и тех же видов топлива.

Таким образом, правильный расчет топочных объемов можно произвести только при условии учета температуры топочного факела, потерь тепла (химических и механических) в процессе горения, содержания летучих веществ, золы и влаги в топливе, способа сжигания (в слое или во взвешенном состоянии), крупности и веса частиц топлива, скорости движения газов

в топочном пространстве, избытка воздуха в процессе горения и давления в топочно-м пространстве.

В теплотехнической литературе до настоящего времени вопрос о расчете топочных устройств с учетом всех вышеуказанных факторов не разбирался; имеющиеся небольшие заметки, главным образом, в периодической литературе касаются большей частью различных частных случаев процесса горения (напр., динамики сжигания частицы топлива, времени горения для пылевидного топлива при определенных условиях) или же ставят проблему определения времени горения топлива, не давая ее разрешения.

Поэтому настоящая работа ставит своей целью указать метод расчета топочных пространств, построенный на базе кинетики химических реакций, и дать обзор формул и методов расчета, предложенных различными авторами до настоящего времени.

Предлагаемая работа предназначена для инженеров паровозников и теплотехников, в большинстве случаев не сталкивающихся в своей практической работе с физической химией (или, как ее иначе называют, химической физикой).

Между тем автору пришлось применять основные формулы теории химической кинетики и вывести, пользуясь теорией Льюиса, ряд новых формул, необходимых для расчета топочного объема.

Поэтому для облегчения при чтении этой работы в §§ 1—4 даны основные положения теории химической кинетики и сведения о константах скоростей реакций и константах равновесия для главнейших реакций, протекающих в топочном пространстве.

## § 1. Основные положения теории химической кинетики.

При определении размеров топочного пространства важное значение имеют физико-химические вопросы. Рассмотрим поэтому основные сведения из теории химической кинетики.

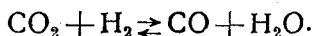
Химические реакции совершаются либо с одной молекулой (напр., реакция разложения какого-нибудь вещества), либо с двумя, либо с тремя, и, наконец, в реакции может участвовать и больше трех молекул. Эти последние реакции являются более редкими. В зависимости от числа участвующих в реакции молекул эти реакции делятся на мономолекулярные, или реакции I порядка, бимолекулярные, или реакции II порядка, тримолекулярные, или реакции III порядка и, наконец, более редко встречающиеся, реакции высших порядков.

Примером реакций I порядка является, например, такая реакция:  $\text{PH}_3 \rightarrow \text{P} + 3\text{H}$ .

Назовем начальную концентрацию вещества, молекула которого претерпевает изменение в мономолекулярной реакции, через  $a$ , причем  $a$  измеряется в молекулярных единицах. Обозначив через  $x$  уменьшение концентрации в течение времени  $t$ , получим, что, по истечении этого времени  $t$ , концентрация будет равна  $a - x$ .

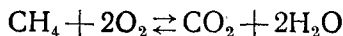
Под скоростью реакции понимают производную от концентрации по времени, или, иначе, отношение положительного или отрицательного приращения концентрации к времени. Таким образом, скорость реакции пропорциональна в каждый данный момент имеющейся в этот момент концентрации. Называя фактор пропорциональности через  $K_1$ , получаем для мономолекулярной реакции:  $W = \frac{dx}{dt} = K_1(a - x)$ .

Примером бимолекулярной реакции является такая реакция:



Здесь скорость реакции выражается так:  $W = \frac{dx}{dt} = K_1(a - x)(b - x)$ , причем попрежнему  $a$  означает начальную концентрацию одного вещества,  $b$  — другого, а  $x$  — уменьшение концентрации вследствие реакции. Концентрация должна быть выражена в молекулярных единицах.

Наконец, реакции:  $2\text{CO} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO}_2$ ;  $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$ ;



являются примерами реакций III порядка. Для них:  $W = \frac{dx}{dt} = K_1(a - x)(b - x)(c - x)$ , где  $c$  — концентрация третьего вещества; в случае наличия двух молекул одного и того же вещества будем иметь:

$$W = \frac{dx}{dt} = K_1(a - x)^2 \cdot (b - x), \text{ или } W = \frac{dx}{dt} = K_1(a - x)(b - x)^2.$$

Во всех этих выражениях  $K_1$  носит название константы скорости химической реакции.

Из выражений скоростей реакций различных порядков легко получить путем интегрирования значение времени, необходимого для изменения концентрации от одного какого-нибудь значения до другого.

При этом в предположении постоянной температуры получим:

$$\text{для мономолекулярной реакции: } t_{\text{мон}} = \frac{1}{K_1} \ln \frac{a}{a - x},$$

$$\text{для бимолекулярной реакции: } t_{\text{бимол}} = \frac{1}{K_1} \cdot \frac{1}{a - b} \ln \frac{(a - x)b}{(b - x)a},$$

$$\text{для тримолекулярной реакции: } t_{\text{тримол}} = \frac{1}{K_1} \left[ \frac{x}{b(a - x)(b - x)} + \frac{1}{(a - b)^2} \ln \frac{a(b - x)}{b(a - x)^2} \right].$$

Последнее выражение получено в предположении такой реакции, в которой одно какое-либо вещество участвует двумя молекулами, а другое одной молекулой, причем начальная

концентрация первого обозначена через  $b$ , а второго через  $a$ . Из этих выражений видно, что теоретически ни одна реакция не заканчивается, так как только при  $t = \infty$  возможно равенство  $x = a$ , т. е. возможно полное превращение реагирующего вещества.

Все приведенные до сих пор выражения относятся к реакциям односторонним, т. е. к таким, которые протекают лишь в одном направлении. В действительности же реакции обычно предполагаются идущими одновременно в двух направлениях, причем при некоторых определенных условиях одно направление берет перевес над другим, но по мере изменения условий это направление постепенно ослабевает, пока не наступит некоторое состояние равновесия, за которым при изменении условий в том же направлении начинается обратное протекание реакции. При таком более общем рассмотрении этого вопроса выражения для скоростей реакций примут следующий вид:

$$W = \frac{dx}{dt} = K_1(a - x) - K_2(a' + x) \text{ для реакций I порядка,}$$

$$W = \frac{dx}{dt} = K_1(a - x)(b - x) - K_2(a' + x)(b' + x) \text{ для реакций II порядка,}$$

$$W = \frac{dx}{dt} = K_1(a - x)(b - x)(c - x) - K_2(a' + x)(b' + x)(c' + x) \text{ для реакций III порядка.}$$

В общем же случае то же выражение имеет вид:

$$W = \frac{dx}{dt} = K_1(a - x)(b - x)(c - x)(d - x) \dots - K_2(a' + x)(b' + x)(c' + x)(d' + x) \dots$$

Здесь  $a, b, c, d \dots$  имеют прежние значения;  $a', b', c', d' \dots$  выражают начальную концентрацию веществ, образующихся при прямой и исчезающих при обратной реакциях,  $K_1$  — представляет константу скорости соединения, а  $K_2$  — константу скорости обратной реакции.

При  $W = \frac{dx}{dt} = 0$  наступает так называемое химическое равновесие. При этом в общем случае получаем:

$$\frac{(a - x_0)(b - x_0)(c - x_0)(d - x_0) \dots}{(a' + x_0)(b' + x_0)(c' + x_0)(d' + x_0) \dots} = \frac{K_2}{K_1} = K; \text{ отсюда } K_2 = K \cdot K_1.$$

Величина  $K$  носит название константы химического равновесия.

При рассмотрении реакций, идущих в двух направлениях, выражения для времени  $t$  получаются более сложными, чем для односторонних реакций.

В целях упрощения выводов во всех дальнейших рассуждениях принята физическая система мер (CGS). Случаи перехода к технической системе мер в каждом случае отмечены особо.

Концентрация в молекулярных единицах может быть подсчитана, например, для кислорода  $O_2$  по известному процентному содержанию его в газах следующим образом: пусть  $M$  (гр) есть масса кислорода в топочных газах,  $m$  (гр)—молекулярный вес его;

$$V_{д.з.} = V'_{д.з.0^{\circ}} \cdot \frac{T_{ф.абс}}{273,2} \cdot \frac{1,0333}{P_{T(атм)}} \text{ литр}$$

объем топочных газов, причем  $T_{ф.абс}$ —абс. температура топочного пространства,  $P_T$ —давление в топке в атм. абс.

Тогда концентрация кислорода

$$a \frac{\text{грмол}}{\text{литр}} = \frac{M/m}{V_{д.з.}} = \frac{M/m}{V'_{д.з.0^{\circ}}} \cdot \frac{273,2}{T_{ф.абс}} \cdot \frac{P_{T(атм)}}{1,0333};$$

так как  $M = \rho_{O_2} \cdot V_{O_2,0^{\circ}}$ , где  $\rho_{O_2}$  гр/литр—плотность кислорода при нормальных условиях, а  $V_{O_2,0^{\circ}}$  литр—объем кислорода при

тех же условиях, то  $a \frac{\text{грмол}}{\text{литр}} = \frac{\rho_{O_2}}{m} \cdot \frac{V_{O_2,0^{\circ}}}{V'_{д.з.0^{\circ}}} \cdot \frac{273,2}{T_{ф.абс}} \cdot \frac{P_{T(атм)}}{1,0333}$ ;

но  $\frac{\rho_{O_2}}{m} = \frac{1}{22,414}$ ;  $\frac{V_{O_2,0^{\circ}}}{V_{д.з.0^{\circ}}} = \phi$ , где  $\phi$ —содержание кислорода в

топочных газах, выраженное в долях их общего объема. Поэтому:

$$a \frac{\text{грмол}}{\text{литр}} = \frac{\phi}{22,414} \cdot \frac{273,2}{T_{ф.абс}} \cdot \frac{P_{T(атм)}}{1,0333} \quad (1-a)$$

Если выражать концентрацию в мол/см<sup>3</sup>, то

$$a \frac{\text{мол}}{\text{см}^3} = \frac{\phi \cdot N_0}{22414} \cdot \frac{273,2}{T_{ф.абс}} \cdot \frac{P_{T(атм)}}{1,0333} \quad (1-b)$$

где  $N_0$ —число Авогардо =  $0,6062 \cdot 10^{24}$  мол/грмол (число молекул в граммолекуле). Так как  $\phi$  представляет отношение объемов, т. е. число отвлеченное, то оба объема, входящие в выражение для  $\phi$ , можно брать в м<sup>3</sup>, что для вычислений удобнее.

## § 2. Определение объемов топочных пространств.

Применим теперь эти данные к процессам, происходящим в топочном пространстве. Как известно, процесс горения твердого топлива можно разбить на 2 стадии: 1) горение в слое и 2) горение в топочном пространстве. Первая стадия процесса—прогрев топлива, выделение летучих и горение твердого углерода кокса, весьма важная сама по себе, т. к. ею определяются мощ-

ность топки, имеет с точки зрения расчета топочного объема значение только в смысле создания определенных температурных условий в топочном пространстве и выделения в него топочных газов определенного состава. Что же касается реакции горения твердого углерода кокса, лежащего на колосниковой решетке, то эта реакция гетерогенна и, как показали многочисленные исследования Смита, Ланга, Ламберта, Хаслама и Русселя, Льюиса, Крейзингера и др., а также новейшие исследования ВТИ, при сравнительно небольшой толщине слоя и малых разностях давления в топке и зольнике, которые имеют место в существующих конструкциях топок, горение твердого углерода заканчивается еще в слое образованием почти исключительно углекислоты ( $\text{CO}_2$ ), вступающей вместе с другими газами в топочное пространство. Реакция горения твердого углерода в  $\text{CO}_2$  протекает сравнительно медленно при температурах, меньших  $800^\circ$  (температуры воспламенения), и значительно ускоряется при достижении горящим углеродом этой температуры, причем в этом случае углерод при горении проходит, главным образом, сначала через стадию образования окиси углерода, которая затем при выходе из слоя обращается в углекислоту. Так как для выжига углерода кокса из слоя в существующих конструкциях топок предоставляется значительное время, то тем самым обеспечивается достаточная полнота этого выжига.

Для определения топочного объема основное значение имеет вторая стадия процесса горения—горение летучих в топочном пространстве, которой обуславливается достаточная экономичность всего процесса горения топлива. Для упрощения задачи сделаем следующие предположения: 1) горючие газы, поступающие от слоя в топочное пространство, выделяются равномерно, 2) горение происходит при постоянной средней температуре топочного факела  $T_\phi$ , которая является средней температурой данного топочного пространства.

Это предположение в первом приближении допустимо, так как исследования температурного поля в топках котлов (см. инж. Шорин „Сжигание антрацитовых штыбов в виде пыли“, Е. Кун „Исследование распределения температур, теплоотдачи и процесса горения в современном котле с пылевидной топкой“, данные испытаний паровозных и стационарных котлов в периодической литературе) установили, что разность между температурой ядра факела и температурой газов в конце топки при различных нагрузках топочной камеры не велика и лежит в пределах  $300\text{—}400^\circ\text{C}$ , причем большая часть объема топки (за исключением незначительных участков ее, прилегающих к стенкам, и мертвых углов) имеет среднюю температуру топочного факела.

Газы примем состоящими из двух частей—горючей и не горючей. Первая часть является реагирующей, а вторая—нейтральным растворителем.

Состав горючих летучих газов, проходящих в топочное пространство, по данным Aufhäuser'a и Эберлина следующий: 1) водород, 2) окись углерода, 3) углеводороды ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$  и др.) и 4) смолы.

При этом заметное выделение углеводородов и смол (60%—70%) наблюдается при температурах 500—600°C, тогда как при температурах 900—1100°C, главным образом, выделяется водород и окись углерода (70%—75%). Чем меньше летучих в топливе, тем больше проходит в топку водорода и меньше CO; по мере увеличения содержания летучих в топливе содержание водорода в газах топочного пространства уменьшается, содержание окиси возрастает, но медленно, а содержание углеводородов сначала растет, а потом падает.

Кроме того, заметим, что при выходе из слоя топлива вместе с вышеперечисленными газами в пламени взвешены частицы сажи и топливной пыли. Скорость реакции каждого из горючих компонентов различна и окисление их заканчивается в неодинаковое время.

Углеводороды, обладая очень высокой по сравнению с CO и  $\text{H}_2$  скоростью реакции, выгорают в первую очередь и притом настолько быстро, что на уровне ~300 мм над слоем топлива обнаруживаются анализом только следы их; на том же уровне заканчивается также и диссоциация углеводородов. Параллельно с горением углеводородов происходит также окисление CO и  $\text{H}_2$ , причем по данным Шаака и Lovell'a окисление  $\text{H}_2$  заканчивается в 2,5—4,9 раз скорее, чем сгорание CO. Таким образом, решающее значение для определения времени горения топочных газов имеет, как наиболее медленно протекающее, окисление CO.

Заметим, что CO участвует в реакции горения двумя молекулами.

Поэтому исследование вопроса произведем, полагая, что горючая часть газов состоит из веществ, превращающихся при горении по законам реакций III порядка, причем эти горючие вещества участвуют в реакции двумя молекулами, и диссоциирующих по законам реакции II порядка, относя все рассуждения к процессу горения окиси углерода CO.

Случай практически полного горения характеризуется неравенством  $a-x < m''$ , где  $m''$ —предельная величина ошибки при анализе газов.

В случае же неполного горения существует зависимость

$$q_3 = \left( \frac{a-x}{a} \right) n' = \left( 1 - \frac{x}{a} \right) n',$$

где  $n'$ —коэффициент пропорциональности,

$q_3$ —потеря тепла от химической неполноты горения, выраженная в долях от теплопроизводительности топочных газов  $Q_{\text{лет}}$ :

$$q_3 = \frac{Q_3' + Q_3''}{Q_{\text{лет}}},$$

причем  $Q_3'$  — потеря тепла от сгорания части углерода  $C''$  % в окись. Для твердых и жидких топлив:  $Q_3' = 56,7 C''$  % кал/кг,  $Q_3''$  — потеря тепла от сажеобразования:  $Q_3'' = 81 \cdot C_{дым}$  % кал/кг, где  $C_{дым}$  % — количество углерода, уходящего в виде сажи, на 1 кг топлива.

Для газообразного топлива:  $Q_3' = \frac{q_3'}{100} Q_n^p = 30,45 CO_{ух}$  %  $\frac{кал}{н.м^3}$ ; отсюда недогоревшее количество окиси углерода равно:

$$CO_{ух} \% = \frac{Q_3'}{30,45} \cdot Q_3'' = \frac{q_3''}{100} Q_n^p \frac{кал}{н.м^3} \quad \text{и} \quad C_{дым} \% = \frac{Q_3''}{81}.$$

Теплопроизводительность горючих топочных газов  $Q_{лет}$ , имея в виду, что решающее значение для определения объема топочного пространства имеют реакции окисления соединений углерода, как наиболее медленно протекающие, может быть определена для твердых и жидких топлив из формулы:  $Q_{лет} = 81 C_{лет}$  % кал/кг, если известно общее содержание летучих в органической массе топлива и химический состав топлива.

При этом  $L_p \% = L_{орг} \% \frac{100 - B}{100} + S_p$  %, где  $B$  — балласт топлива, равный:  $B = W_p \% + A_p \% + S_p$  %;

$$C_{лет} \% = L_p \% - H_p \% - O_p \% - N_p \% - S_p \% \quad (2)$$

Если содержание горючих летучих в топливе не известно, то  $Q_{лет}$  можно определить из уравнения:  $Q_{лет} = \alpha_0'' \cdot Q_n^p$ .

Коэффициент  $\alpha_0'' = \frac{Q_{лет}}{Q_n^p}$  по данным Constam'a и Schlapfer'a имеет следующие значения:

- 1) для антрацита (с содержанием летучих в орг. массе 6—10%) (марка АП, АШ, АР, АС, АРШ и др.)  $\alpha_0'' = 0,04 - 0,06$ ;
- 2) для тощих углей (с содержанием летучих в орг. массе 10—15%) (марка углей Т)  $\alpha_0'' = 0,06 - 0,10$ ;
- 3) для полужирных углей (с содержанием летучих в орг. массе 15—26%) (марка углей ПС)  $\alpha_0'' = 0,10 - 0,16$ ;
- 4) для жирных углей (с содержанием летучих в орг. массе 26—32%) (марка углей ПЖ, Ф)  $\alpha_0'' = 0,16 - 0,22$ ;
- 5) для пламенных углей (с содержанием летучих в орг. массе 32—50%) (марка углей Д и др.)  $\alpha_0'' = 0,22 - 0,30$ ;
- 6) для бурых углей (с содержанием летучих в орг. массе 50—60%)  $\alpha_0'' = 0,30 - 0,38$ ;
- 7) для торфа (с содержанием летучих в орг. массе 60—75%)  $\alpha_0'' = 0,38 - 0,5$ ;
- 8) для дров (с содержанием летучих в орг. массе 75—85%)  $\alpha_0'' = 0,5 - 0,7$ ;
- 9) для нефтяных остатков (с содержанием летучих в орг. массе 75—85%)  $\alpha_0'' = 0,5 - 0,6$ .

Для газообразных топлив  $Q_{лет} = 30,45 CO \% + 43,3 CH_4 \% + 86,6 X \times (C_2H_2 \% + C_2H_4 \% + C_2H_6 \% ) + 129,9 (C_3H_6 \% + C_3H_8 \% ) + \dots$   $\frac{кал}{н.м^3}$



Для того, чтобы связать все изложенное выше с определением объема топочного пространства и вообще с характеристикой происходящих в нем процессов, примем следующие обозначения:

$\mathcal{V}$  — объем топочного пространства в  $\text{м}^3$ ;  $B$  — расход топлива в час в  $\text{кг}$ ;  $V'_{\text{д.г.топ}} \frac{\text{н.м}^3}{\text{кг}}$  — объем газов, поступающих в топочное пространство, отнесенный к 1  $\text{кг}$  топлива при нормальных условиях;  $D_p$  — расход пара в час в  $\text{кг}$ ;  $\lambda$  — полная теплота пара в  $\text{кал/кг}$ ;  $Q$  — тепло, вносимое в топку, отнесенное к 1  $\text{кг}$  топлива в  $\text{кал/кг}$ ;  $t$  — время в секундах, в течение которого рассматриваемая реакция горения доходит до того предела, при котором содержание горючих элементов становится меньше возможной ошибки приборов, анализирующих газ, или то время, в течение которого процесс горения доходит до допустимой на практике неполноты сгорания, или, наконец, то время, в течение которого газы вообще находятся в топочном пространстве;  $\eta_{\text{ку}}$  — коэффициент полезного действия котла. При этом, как легко видеть, имеют место следующие соотношения:

$$\mathcal{V} = \frac{D_p \lambda}{Q \cdot \eta_{\text{ку}}} \cdot \frac{V'_{\text{д.г.топ}}}{3600} \cdot \frac{T_{\text{ф. абс}}}{273,2} \cdot \frac{1,0333}{P_{\text{Г(атм)}}} t =$$

$$= \frac{B \cdot V'_{\text{д.г.топ}}}{3600} \cdot \frac{T_{\text{ф. абс}}}{273,2} \cdot \frac{1,0333}{P_{\text{Г(атм)}}} t \text{ м}^3, \quad (3)$$

причем:  $\frac{B \cdot V'_{\text{д.г.топ}}}{3600} \cdot \frac{T_{\text{ф. абс}}}{273,2} \cdot \frac{1,0333}{P_{\text{Г(атм)}}} = V \text{ сек} \cdot \text{м}^3/\text{сек}$  — секундный объем дымовых газов.

Здесь  $T_{\text{ф. абс}}$  — средняя температура топочного факела в абс. градусах;  $P_{\text{Г}}$  — давление в топке в  $\text{кг/см}^2$  абс.

После определения объема топочного пространства можно определить величину напряжения топочного объема:

$$y_0 = \frac{B Q_p^2}{\mathcal{V}} \text{ кал./м}^3 \text{ час.} \quad (3-a)$$

Для различных топлив можно допускать следующие значения  $y_0$  в топках стационарных котлов:

Торф и дрова в шахтных топках —  $y_0 = 300000$ — $400000$   $\text{кал./м}^3 \text{ час.}$

Бурый уголь, торф и дрова на ручных колосниковых решетках —  $y_0 = 500000$ — $700000$  " "

Бурый уголь на ступенчатых решетках и в механических топках —  $y_0 = 220000$ — $250000$  " "

Каменные угли не спекающиеся . —  $L_{\text{орг}} = 40$ — $50\%$  (мех. топки)  $250000$  " "

Каменные угли не спекающиеся . —  $L_{\text{орг}} = 40\%$  " "  $330000$  " "

Каменные угли спекающиеся . . —  $L_{\text{орг}} = 30\%$  " "  $420000$  " "

Каменные угли спекающиеся . . —  $L_{\text{орг}} = 20\%$  " "  $450000$  " "



Отсюда получена следующая зависимость между константой  $K_1$  и абсолютной температурой:

$$\text{для древесного угля: } \ln K_1 = -\frac{50910}{T_{\text{абс}}} - 0,0203 \cdot T_{\text{абс}} + 65,376;$$

$$\text{для кокса: } \dots \ln K_1 = -\frac{47200}{T_{\text{абс}}} - 0,009699 \cdot T_{\text{абс}} + 45,597;$$

$$\text{для антрацита: } \dots \ln K_1 = -\frac{31972}{T_{\text{абс}}} + 0,02272 \cdot T_{\text{абс}} - 56,607.$$

Что же касается наиболее важных для топок котлов реакций  $2\text{CO} + \text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{CO}_2$  и  $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{H}_2\text{O}$ , то надежных опытных данных относительно скорости их протекания при температурах и условиях топочного пространства до настоящего времени не имеется.

По данным Геллье, в смеси  $2\text{H}_2 + \text{O}_2$  через 3 минуты их взаимодействия соединились следующие количества:

Температура в ° абс. . . . . 450, 475, 510, 600, 700, 900, 1100, 1120

Количество соединения в % 0,04, 0,12, 1,3, 9,8, 39,8, 84,5, 96,1 взрыв.

В смеси  $2\text{CO} + \text{O}_2$  после нескольких минут реагирования вступили в соединение следующие количества:

Температура в ° абс. . . . . 470, 575, 680, 775, 840, 875, 960, 1130

Количество соединения в % 0,13, 0,44, 3,03, 6,2, 14,4, 21,1, 46,4, 65,0.

Надо заметить, что абсолютная величина этих цифр имеет значение только для условий опыта, при которых эти цифры были получены, так как другие исследователи, как, например, Ван-Гофф, получили значения для этих реакций, резко отличающиеся от данных Геллье. Для реакции  $2\text{H}_2 + \text{O}_2$  Ван-Гофф нащел, что при  $T = 720^\circ$  абс. через 20 часов соединились только 7%, а через 60 часов—14%. Такое расхождение данных Геллье и Ван-Гоффа, по мнению Ле-Шателье, объясняется контактным воздействием на реакцию стенок сосудов, в которых находились реагирующие газы.

Однако на основании этих цифр можно заключить о незначительной величине температурного коэффициента скорости реакции соединения газов  $\text{CO}$  и  $\text{H}_2\text{O}$  с кислородом в интервале температур  $600^\circ - 1100^\circ$  абс., представляющего отношение константы скорости реакции при температуре  $(T + 10)^\circ$  к константе скорости реакции при температуре  $T^\circ$ .

Величина этого коэффициента получается равной для указанного интервала температуры: 1,22—1,2 для температуры  $600^\circ$  абс. и падает до 1,08—1,06 для температуры  $1100^\circ$  абс.

По данным Диксона и Бона, скорость распространения пламени в смеси  $2\text{CO} + \text{O}_2$  резко возрастает с увеличением содержания в ней влаги, а именно:

	Средняя скорость пламени в м/сек
Для высушенной смеси $2\text{CO} + \text{O}_2$ . . . . .	44—103
При влажности 0,9% . . . . .	125
"      "      1,06% . . . . .	155
"      "      1,34% . . . . .	200
"      "      5,6% . . . . .	226

При дальнейшем увеличении влажности смеси сверх 5,6% добавочная влага действует как нейтральный растворитель.

Входящая в выражение для времени  $t$  константа равновесия  $K_c$ , вычисляемая по объемным концентрациям ( $\frac{\text{гмол}}{\text{литр}}$ ,  $\frac{\text{мол}}{\text{см}^3}$ ) может быть определена из уравнения:

$$K_c = \frac{K_p}{(R \cdot T_{\text{абс}})^{\Delta n}},$$

где  $K_p$  — константа равновесия, вычисленная по парциальным давлениям;  $R$  — газовая постоянная =  $0,08205 \frac{\text{литр} \cdot \text{атм}}{\text{гмол} \cdot \text{градус}}$ ;  $T_{\text{абс}}$  — абс. температура;  $\Delta n$  — общее изменение числа молекул веществ, вступающих в реакцию и возникающих в результате ее.

Константа равновесия  $K_p$  имеет следующие значения:

1) для реакции  $\text{C} + \text{CO}_2 \rightleftharpoons 2\text{CO}$  на основании закона Ван-Гоффа

$$\ln K_p = -\frac{20235}{T_{\text{абс}}} + 1,035 \ln T_{\text{абс}} - 0,001564 T_{\text{абс}} + 8,604,$$

или  $\lg K_p = -\frac{8788}{T_{\text{абс}}} + 1,035 \lg T_{\text{абс}} - 0,0006766 T_{\text{абс}} + 3,7367;$

2) для реакции  $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{H}_2\text{O}$  по таблицам Landolt'a:

$$\lg K_p = -\frac{24900}{T_{\text{абс}}} + 1,335 \lg T_{\text{абс}} - 9,65 \cdot 10^{-5} \cdot T_{\text{абс}} +$$

$$+ 1,37 \cdot 10^{-7} \cdot T_{\text{абс}}^2 - 6,65 \cdot 10^{-11} \cdot T_{\text{абс}}^3 + 1,907 \cdot 10^{-18} \cdot T_{\text{абс}}^5 - 1,08;$$

или проще, по данным Hofmann'a:

$$\lg K_p = -\frac{26099}{T_{\text{абс}}} + 6,015;$$

для той же реакции, по данным проф. Кистяковского:

$$\lg K_c = -\frac{25300}{T_{\text{абс}}} + 3,34;$$

3) для реакции  $2\text{CO} + \text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{CO}_2$  из таблиц Landolt'a:

$$\lg K_p = -\frac{29500}{T_{abc}} + 1,75 \lg T_{abc} - 1,215 \cdot 10^{-3} T_{abc} + \\ + 1,35 \cdot 10^{-7} \cdot T_{abc}^2 + 3,29;$$

или проще, по данным Hofmann'a:

$$\lg K_p = -\frac{29550}{T_{abc}} + 9,44;$$

для той же реакции, по данным проф. Кистяковского:

$$\lg K_c = -\frac{28766}{T_{abc}} + 6,766 ;$$

4) для реакции  $\text{H}_2 + \text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{H}_2\text{O} + \text{CO}$ , по данным Энгельса:

$$\lg K_p = -\frac{2170}{T_{abc}} + 0,979 \lg T_{abc} - 1,082 \cdot 10^{-3} \cdot T_{abc} + 1,734 \cdot 10^{-7} \cdot T_{abc}^2;$$

5) для реакции  $2\text{SO}_2 + \text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{SO}_3$ , по данным Боденштейна:

$$\lg K_c = -\frac{10373}{T_{abc}} - 2,222 \lg T_{abc} + 14,585.$$

Наконец, константы равновесия по парциальным давлениям можно вычислять по приближенной формуле Нернста:

$$\lg K_p = -\frac{Q_0}{2,3026 \cdot R \cdot T_{abc}} + \Delta n \cdot 1,75 \lg T_{abc} + \Sigma i = \\ = -0,43429 \frac{Q_0}{R \cdot T_{abc}} + \Delta n \cdot 1,75 \lg T_{abc} + \Sigma i,$$

где  $Q_0$  — теплота реакции в *кал/гмол*;  $R$  — газовая постоянная =  $1,987$  *кал/гмол·град*;  $\Delta n$  — разность между числами *гмол* веществ, вступающих в реакцию и возникающих в результате ее;  $\Sigma i$  — сумма условных химических постоянных веществ, вступающих в реакцию и возникающих в результате ее.

Так как реакции, протекающие в топочном пространстве, идут, главным образом, с изменением числа молей на единицу, то по данным Нернста можно принять: при  $\Delta n = 1$

$$\lg K_p \cong -0,43429 \frac{Q_0}{R \cdot T_{abc}} + 1,75 \lg T_{abc} + 3$$

или 
$$K_p \cong 1000 \cdot T_{abc}^{1,75} \cdot e^{-\frac{Q_0}{R \cdot T_{abc}}}, \quad (4-a)$$

если происходит диссоциация на молекулы.

Для реакции окисления топлива на колосниковой решетке

$$\Delta n = 0, \text{ а потому } \lg K_p \cong -0,43429 \frac{Q_0}{R \cdot T_{abc}}$$

или 
$$K_p \cong e^{-\frac{Q_0}{R \cdot T_{abc}}}. \quad (5-a)$$

При этом константы равновесия по объемным концентрациям (г/мол/литр) выразятся: при  $\Delta n = 1$

$$K_c = \frac{K_p}{R \cdot T_{abc}} = \frac{1000}{0,08205} \cdot T_{abc}^{0,75} \cdot e^{-\frac{Q_0}{R \cdot T_{abc}}} \quad (4-b)$$

при  $\Delta n = 0$ : 
$$K_c = K_p \cong e^{-\frac{Q_0}{R \cdot T_{abc}}}. \quad (5-b)$$

Из вышеприведенных данных видно, что в отношении констант равновесия для топочных реакций имеется достаточное число уравнений, позволяющих вычислить эти константы с желаемой степенью точности; что же касается констант скоростей реакций, то для вычисления их вышеприведенных уравнений недостаточно, а потому необходимо обратиться к рассмотрению кинетики реакций, происходящих в топочном пространстве, что дает возможность выяснить недостающие значения констант скоростей реакций, потребных для вычисления времени горения.

#### § 4. Определение времени горения топлива.

Наиболее важные для определения времени горения процессы, происходящие в топочном пространстве, как было указано выше, представляют главным образом реакции типа:  $2A + B \rightleftharpoons 2AB$ .

Здесь две молекулы газа  $A$  и одна молекула газа  $B$  образуют две молекулы газа  $AB$  и, обратно, две молекулы газа  $AB$  распадаются на две молекулы газа  $A$  и одну молекулу газа  $B$ . Таким образом, образование молекул газа  $AB$  идет по законам тримолекулярной реакции, а диссоциация молекул газа  $AB$  является бимолекулярной реакцией.

Обозначим начальную концентрацию газов  $A$  и  $B$  соответственно через  $a$  и  $b$ , начальную концентрацию газа  $AB$  через  $f$ , изменение концентрации газа  $A$  через  $2x$ , газа  $B$  через  $x$  и газа  $AB$  через  $2x$ . Тогда скорость реакции  $2A + B \rightleftharpoons 2AB$  может быть выражена уравнением:

$$\frac{2dx}{dt} = K_1(a-2x)^2(b-x) - K_2(f+2x)^2,$$

где  $K_1$  — константа скорости тримолекулярной реакции соединения молекул газов  $A$  и  $B$ , а  $K_2$  — константа скорости бимолекулярной реакции диссоциации молекул газа  $AB$ .

Для определения величины констант скорости  $K_1$  и  $K_2$  воспользуемся теорией Льюиса (Lewis) (исправленной теорией Крюгера).

Эта теория заключается в следующем: пусть два газа  $A$  и  $B$  дают соединение  $AB$ , причем реакция может протекать в прямом и обратном направлениях. Действие каждой активной молекулы газа  $A$  распространяется на объем сферы радиуса  $\rho$  см, описанной из центра этой молекулы. Каждый раз как только центр активной молекулы газа  $B$  попадает в эту сферу, она удерживается молекулой газа  $A$  и получается соединение  $AB$ . В дальнейшем теория Льюиса основывается на следующих допущениях: 1) молекула газа  $B$ , находясь внутри сферы действия молекулы газа  $A$ , имеет полную свободу перемещения; 2) скорости молекул газа  $B$  внутри молекул газа  $AB$  подчиняются закону Максвелла—Больцмана; 3) молекула газа  $B$  тогда лишь может оторваться от молекулы газа  $AB$ , когда ее скорость по отношению к молекуле газа  $A$  превзойдет некоторую величину  $u$ ; 4) каждое столкновение активных молекул газов  $A$  и  $B$  ведет к образованию молекулы газа  $AB$ .

Приняв во внимание эти допущения, рассмотрим прежде всего процесс диссоциации молекул газа  $AB$ .

Пусть в 1 куб. см содержится  $n_3$  молекул газа  $AB$ ; диаметр молекулы газа  $AB$ , являющийся радиусом сферы ее ограждения и радиусом сферы действия молекулы газа  $A$ , входящей в состав молекулы газа  $AB$ , обозначим через  $\rho$  см. Молекула газа  $AB$  при движении со средней скоростью  $w$  описывает в пространстве цилиндрический объем  $\pi \cdot \rho^2 \cdot w$  см<sup>3</sup>/сек.

Так как в каждом куб. см содержится  $n_3$  молекул газа  $AB$ , то в указанном объеме их будет  $\pi \cdot \rho^2 \cdot w \cdot n_3$ ; таково же будет и число столкновений одной молекулы с остальными; принимая во внимание также и движение всех молекул газа  $AB$  и при том по всем направлениям и с разными скоростями, необходимо вышеуказанное выражение для числа столкновений одной молекулы газа  $AB$  с остальными увеличить, по данным Максвелла в  $\sqrt{2}$  раз; таким образом, число столкновений одной молекулы газа  $AB$  с остальными молекулами равно  $\sqrt{2} \cdot \pi \cdot \rho^2 \cdot w \cdot n_3$ , а для всех  $n_3$  молекул, содержащихся в 1 куб. см, число столкновений будет равно  $\sqrt{2} \cdot \pi \cdot \rho^2 \cdot w \cdot n_3^2$  столкн./см<sup>3</sup> сек.

Однако, способными к диссоциации, по данным Аррениуса, являются не все молекулы газа  $AB$ , а только активные молекулы, обладающие повышенной кинетической энергией.

Опыт показывает, что в случае бимолекулярной реакции мы имеем дело с энергией поступательного движения, являющейся суммой компонентов кинетической энергии каждой молекулы вдоль линии их сближения, а это дает нам возможность ограничиться рассмотрением распределения скоростей движения молекул в плоскости (две степени свободы). Активными молекулами при этом будут те молекулы, поступательная скорость движения коих превышает некоторое значение  $u$ ; число моле-

кул, скорости которых лежат в пределах от  $u$  до  $u + du$ , по данным Максвелла, составляет от общего числа молекул  $n_3$  часть, равную:

$$\frac{dn}{n_3} = \frac{2}{\alpha^2} \cdot e^{-\frac{u^2}{\alpha^2}} \cdot u \cdot du,$$

где  $\alpha$  — наиболее вероятная скорость молекул, равная

$\sqrt{\frac{2R \cdot T_{\phi.abc}}{m_3}}$  см/сек, причем  $m_3$  есть молекулярный вес (масса

г/мол) рассматриваемого газа. Подставляя значение  $\alpha$  в это выражение Максвелла, получаем:

$$\frac{dn}{n_3} = \frac{m_3}{R \cdot T_{\phi.abc}} \cdot e^{-\frac{m_3 \cdot u^2}{2R \cdot T_{\phi.abc}}} \cdot u \cdot du = \frac{m_3}{R \cdot T_{\phi.abc}} \cdot e^{-\frac{\frac{1}{2} m_3 u^2}{R \cdot T_{\phi.abc}}} \cdot u \cdot du.$$

Здесь газовая постоянная  $R = 0,8313 \cdot 10^8$  эрг/градус.

Обозначив  $\frac{1}{2} m_3 u^2$  через  $I$ , где  $I$  — кинетическая энергия молекулы, имеем:

$$\frac{m_3 \cdot u^2}{2} = I; \quad u^2 = \frac{2I}{m_3}; \quad u \cdot du = \frac{dI}{m_3}.$$

Подставив эти значения вместо  $u \cdot du$  и  $\frac{m_3 u^2}{2}$  в выражение для  $\frac{dn}{n_3}$ , получаем:

$$\frac{dn}{n_3} = \frac{m_3}{R \cdot T_{\phi.abc}} \cdot e^{-\frac{I}{R \cdot T_{\phi.abc}}} \cdot \frac{dI}{m_3} = \frac{1}{R \cdot T_{\phi.abc}} \cdot e^{-\frac{I}{R \cdot T_{\phi.abc}}} \cdot dI.$$

Интегрируя это выражение в пределах от  $I$  до  $\infty$ , получим:

$$\frac{n}{n_3} = e^{-\frac{I}{R \cdot T_{\phi.abc}}} \quad \text{или} \quad n = n_3 \cdot e^{-\frac{I}{R \cdot T_{\phi.abc}}},$$

поэтому число столкновений активных молекул равно:

$$\sqrt{2} \cdot \pi \cdot \rho^2 \cdot \omega \cdot n_3^2 \cdot e^{-\frac{2I}{R \cdot T_{\phi.abc}}}.$$

Обозначив  $2I$  через  $E_2$ , где  $E_2$  — энергия активации молекул газа  $AB$ , необходимая для их диссоциации, получим для числа столкновений активных молекул выражение:

$$\sqrt{2} \cdot \pi \cdot \rho^2 \cdot \omega \cdot n_3^2 \cdot e^{-\frac{E_2}{R \cdot T_{\phi.abc}}}.$$

Подставляя значение скорости  $\omega = \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{R \cdot T_{\phi.abc}}{m_3}}$ ,



где  $m_3$ —молекулярный вес (масса *г/мол*) газа  $AB$  в граммах окончательно получаем для числа столкновений:

$$\begin{aligned} & \sqrt{2} \cdot \pi \rho^2 \cdot \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{R \cdot T_{\phi.abc}}{m_3}} \cdot n_3^2 e^{-\frac{E_2}{R \cdot T_{\phi.abc}}} = \\ & = 2\sqrt{2} \cdot \rho^2 \sqrt{2\pi R \cdot T_{\phi.abc}} \cdot \sqrt{\frac{1}{m_3}} \cdot n_3^2 e^{-\frac{E_2}{R \cdot T_{\phi.abc}}} \end{aligned}$$

Так как при каждом столкновении исчезают две молекулы газа  $AB$ , убылью концентрации которого выражается скорость реакции, то число исчезнувших молекул в *1 куб. см* в сек. составляет:

$$v_2 = 2 \cdot 2\sqrt{2} \cdot \rho^2 \cdot \sqrt{2\pi R \cdot T_{\phi.abc}} \cdot \sqrt{\frac{1}{m_3}} \cdot n_3^2 e^{-\frac{E_2}{R \cdot T_{\phi.abc}}} \text{ мол/см}^3 \text{ сек.}$$

Переходя к концентрациям в *г/мол/литр*, получим:

$$v_2 = 4\sqrt{2} \cdot \rho^2 \cdot \sqrt{2\pi R \cdot T_{\phi.abc}} \cdot \sqrt{\frac{1}{m_3}} \cdot n_3^2 e^{-\frac{E_2}{R \cdot T_{\phi.abc}}} \cdot \frac{10^3}{N_0} \frac{\text{г/мол}}{\text{литр} \cdot \text{сек}}$$

С другой стороны, скорость реакции диссоциации:

$$v_2 = K_2 \cdot \frac{n_3^2 \cdot 10^6}{N_0^2} \frac{\text{г/мол}}{\text{литр} \cdot \text{сек}},$$

где  $K_2$ —константа скорости диссоциации молекул газа  $AB$ .

Сравнивая оба выражения для  $v_2$ , имеем:

$$K_2 \cdot n_3^2 \cdot \frac{10^6}{N_0^2} = 4\sqrt{2} \cdot \rho^2 \sqrt{2\pi R \cdot T_{\phi.abc}} \cdot \sqrt{\frac{1}{m_3}} \cdot n_3^2 e^{-\frac{E_2}{R \cdot T_{\phi.abc}}} \cdot \frac{10^3}{N_0},$$

откуда

$$K_2 = 4\sqrt{2} \cdot \rho^2 \sqrt{2\pi R \cdot T_{\phi.abc}} \cdot \sqrt{\frac{1}{m_3}} \cdot e^{-\frac{E_2}{R \cdot T_{\phi.abc}}} \cdot \frac{N_0}{10^3} \frac{\text{литр}}{\text{г/мол} \cdot \text{сек}} \quad (6-a)$$

Процесс образования молекул газа  $AB$  из молекул газов  $A$  и  $B$  обуславливается числом тройных столкновений активных молекул газов  $A$  и  $B$ . Пусть в *1 куб. см* содержится  $n_1$  молекул газа  $A$  и  $n_2$  молекул газа  $B$ . Радиус сферы действия молекулы газа  $A$  обозначим через  $\rho$  см. Молекула газа  $A$  при своем движении

со средней скоростью реагирующих молекул  $\omega_0 = \sqrt{\frac{2\omega_1^2 + \omega_2^2}{3}}$ ,

где  $\omega_1$ —средняя скорость молекул газа  $A$ , а  $\omega_2$ —средняя скорость молекулы газа  $B$ , описывает в пространстве объем  $\pi \cdot \rho^2 \cdot \omega_0$  см<sup>3</sup>. Так как в каждом *куб. см* содержится  $n_2$  молекул газа  $B$ , то число столкновений одной молекулы газа  $A$  с молекулами газа  $B$ , если учесть также и движение молекул газа  $B$  по всем направлениям и с различными скоростями, равно по данным Максвелла  $\sqrt{2} \cdot \pi \rho^2 \cdot \omega_0 \cdot n_2$ , а для всех  $n_1$  молекул газа  $A$  равно  $\sqrt{2} \cdot \pi \rho^2 \cdot \omega_0 \cdot n_2 \cdot n_1$ .

Полученное число  $\sqrt{2} \cdot \pi r^2 \cdot \omega_0 \cdot n_2 \cdot n_1$  представляет число двойных столкновений молекул газов  $A$  и  $B$ . Число столкновений, в которых одновременно участвуют по две молекулы газа  $A$  и по одной молекуле газа  $B$ , будет, очевидно, меньше числа двойных столкновений реагирующих молекул. Для определения отношения числа тройных столкновений к числу двойных столкновений реагирующих молекул воспользуемся следующими соображениями: если в 1 куб. см находится одна молекула какого-либо газа, то вероятность того, что эта молекула в некоторый момент времени будет находиться в данном объеме  $\sigma$ , равном сфере действия молекулы газа  $A$ , очевидно, равна отношению объемов

$\frac{\sigma}{1 \text{ см}^3} = \sigma$ . Если в 1 куб. см находится не одна молекула какого-либо газа, а  $n$  молекул его, то вероятность того, что в данном объеме  $\sigma$  будет находиться какая-нибудь из всех этих молекул, равна  $n \cdot \sigma$ . Применяя эти рассуждения к молекулам газов  $A$  и  $B$ , получим вероятности нахождения одной молекулы газа  $A$  и одной молекулы газа  $B$  в данном объеме  $\sigma$ , равные соответственно  $n_1 \sigma$  и  $n_2 \sigma$ . Вероятность одновременного нахождения в данном объеме одной молекулы газа  $A$  и одной молекулы газа  $B$  равна по закону вероятностей сложных независимых событий произведению элементарных вероятностей, т. е.  $n_1 \sigma \cdot n_2 \sigma = n_1 \cdot n_2 \cdot \sigma^2$ .

Так как в 1 куб. см содержится  $\frac{1}{\sigma}$  данных объемов  $\sigma$ , то вероятность двойных столкновений молекул газов  $A$  и  $B$  в 1 куб. см равна:  $n_1 \cdot n_2 \cdot \sigma^2 \cdot \frac{1}{\sigma} = n_1 \cdot n_2 \cdot \sigma$ .

Применяя те же рассуждения для одновременного нахождения в данном объеме  $\sigma$  двух молекул газа  $A$  и одной молекулы газа  $B$ , находим вероятность тройных столкновений молекул газов  $A$  и  $B$  в 1 куб. см, равную:  $n_1 \sigma \cdot n_1 \sigma \cdot n_2 \sigma \cdot \frac{1}{\sigma} = n_1^2 \cdot n_2 \cdot \sigma^2$ .

Отношение числа тройных столкновений к числу двойных столкновений молекул газов  $A$  и  $B$  равно поэтому

$$\frac{n_1^2 \cdot n_2 \cdot \sigma^2}{n_1 \cdot n_2 \cdot \sigma} = n_1 \sigma = n_1 \cdot \frac{4}{3} \pi \cdot \rho^3.$$

Полученное значение совпадает с данными Боденштейна и Гиншельвуда, по указаниям которых отношение числа тройных столкновений к числу двойных приблизительно равно отношению радиуса сферы действия  $\rho$  (молекулярного диаметра) молекулы газа  $A$  к ее свободному пробегу среди молекул того же газа

$$l = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot \rho^2 \cdot n_1}, \text{ т. е. равно } \sqrt{2} \cdot \pi \cdot \rho^3 \cdot n_1.$$

Таким образом, для числа тройных столкновений молекул газов  $A$  и  $B$  в одном куб. см в секунду получаем выражение:

$$\sqrt{2} \cdot \pi \cdot \rho^2 \cdot \omega_0 \cdot n_1 \cdot n_2 \cdot n_1 \cdot \frac{4}{3} \pi \cdot \rho^3 = \frac{4}{3} \sqrt{2} \cdot \pi^2 \cdot \rho^5 \cdot \omega_0 \cdot n_1^2 \cdot n_2$$

Но к реакции соединения приводят по вышеуказанному только столкновения активных молекул газов  $A$  и  $B$ , число коих, как отмечено выше, равно соответственно  $n_1 \cdot e^{-\frac{I_1}{R \cdot T_{\phi.abc}}}$  и  $n_2 \cdot e^{-\frac{I_2}{R \cdot T_{\phi.abc}}}$ , где  $I_1$  и  $I_2$  — кинетические энергии молекул газов  $A$  и  $B$ . Подставляя вместо  $n_1$  и  $n_2$  соответственно  $n_1 \cdot e^{-\frac{I_1}{R \cdot T_{\phi.abc}}}$  и  $n_2 \cdot e^{-\frac{I_2}{R \cdot T_{\phi.abc}}}$ , а также значение

$$\begin{aligned} \omega_0 &= \sqrt{\frac{2\omega_1^2 + \omega_2^2}{3}} = \sqrt{\frac{\frac{2 \cdot 8R \cdot T_{\phi.abc}}{\pi m_1} + \frac{8R \cdot T_{\phi.abc}}{\pi m_2}}{3}} = \\ &= \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{\pi}} \sqrt{R \cdot T_{\phi.abc}} \sqrt{\frac{\left(\frac{2}{m_1} + \frac{1}{m_2}\right) \frac{1}{3}}{3}} = \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{\pi}} \sqrt{R \cdot T_{\phi.abc}} \sqrt{\frac{2m_2 + m_1}{3m_1 m_2}} \end{aligned}$$

где  $m_1$  — молекулярный вес (масса грмол) газа  $A$  в граммах, а  $m_2$  — молекулярный вес газа  $B$ , и обозначив  $2I_1 + I_2$  через  $E_1$ , где  $E_1$  — энергия активации молекул газов  $A$  и  $B$ , необходимая для реакции образования молекулы газа  $AB$ , для числа активных столкновений в 1 см<sup>3</sup> в сек., получим выражение:

$$\begin{aligned} &\frac{4}{3} \sqrt{2} \cdot \pi^2 \cdot \rho^5 \cdot \omega_0 \cdot n_1^2 \cdot n_2 \cdot e^{-\frac{2I_1 + I_2}{R \cdot T_{\phi.abc}}} = \\ &= \frac{4}{3} \sqrt{2} \cdot \pi^2 \cdot \rho^5 \cdot \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{\pi}} \sqrt{R \cdot T_{\phi.abc}} \sqrt{\frac{2m_2 + m_1}{3m_1 m_2}} \cdot n_1^2 \cdot n_2 \cdot e^{-\frac{E_1}{R \cdot T_{\phi.abc}}} \end{aligned}$$

Так как при каждом активном тройном столкновении исчезают две молекулы газа  $A$ , убылью концентрации которого выражается скорость реакции, то число исчезнувших молекул газа  $A$ , а, следовательно, и число образовавшихся молекул газа  $AB$  равно:

$$\begin{aligned} v_{1 \frac{\text{мол}}{\text{см}^3 \text{сек}}} &= 2 \cdot \frac{4}{3} \sqrt{2} \cdot \pi^2 \cdot \rho^5 \cdot 2\sqrt{2} \sqrt{\pi R \cdot T_{\phi.abc}} \sqrt{\frac{2m_2 + m_1}{3m_1 m_2}} \cdot n_1^2 \cdot n_2 \cdot e^{-\frac{E_1}{R \cdot T_{\phi.abc}}} = \\ &= \frac{16\sqrt{2}}{3} \pi^2 \cdot \rho^5 \cdot \sqrt{2\pi R \cdot T_{\phi.abc}} \cdot \sqrt{\frac{2m_2 + m_1}{3m_1 m_2}} \cdot n_1^2 \cdot n_2 \cdot e^{-\frac{E_1}{R \cdot T_{\phi.abc}}} \end{aligned}$$

Переходя к концентрации в *грмол/литр*, получим:

$$v_1 = \frac{16\sqrt{2}}{3} \pi \rho^5 \sqrt{2\pi R \cdot T_{\phi.abc}} \cdot \sqrt{\frac{2m_2 + m_1}{3m_1 m_2}} \cdot n_1^2 n_2 \cdot e^{-\frac{E_1}{R \cdot T_{\phi.abc}}} \cdot \frac{10^3 \text{ грмол}}{N_0 \text{ литр}}$$

С другой стороны, скорость реакции:

$$v_1 = K_1 \cdot \frac{n_1^2 \cdot n_2 \cdot 10^9}{N_0^3} \frac{\text{грмол}}{\text{литр} \cdot \text{сек}},$$

где  $K_1$  — константа скорости реакции образования молекул газа АВ. Следовательно, имеем:

$$K_1 \cdot \frac{n_1^2 n_2 \cdot 10^9}{N_0^3} = \frac{16\sqrt{2}}{3} \pi \rho^5 \cdot \sqrt{2\pi R \cdot T_{\phi.abc}} \times \\ \times \sqrt{\frac{2m_2 + m_1}{3m_1 m_2}} \cdot n_1^2 n_2 e^{-\frac{E_1}{R \cdot T_{\phi.abc}}} \cdot \frac{10^3}{N_0},$$

откуда:

$$K_1 = \frac{16\sqrt{2}}{3} \pi \rho^5 \cdot \sqrt{2\pi R \cdot T_{\phi.abc}} \cdot \sqrt{\frac{2m_2 + m_1}{3m_1 m_2}} \times \\ \times e^{-\frac{E_1}{R \cdot T_{\phi.abc}}} \cdot \frac{N_0^2}{10^6} \left( \frac{\text{литр}}{\text{грмол}} \right)^2 \frac{1}{\text{сек}}.$$

Так как константа равновесия  $K = \frac{K_2}{K_1}$ , то значит:

$$K = \frac{4\sqrt{2} \cdot \rho^2 \sqrt{2\pi R \cdot T_{\phi.abc}} \cdot \sqrt{\frac{1}{m_3}} \cdot e^{-\frac{E_2}{R \cdot T_{\phi.abc}}} \cdot \frac{N_0}{10^3}}{\frac{16\sqrt{2}}{3} \pi \rho^5 \cdot \sqrt{2\pi R \cdot T_{\phi.abc}} \cdot \sqrt{\frac{2m_2 + m_1}{3m_1 m_2}} \cdot e^{-\frac{E_1}{R \cdot T_{\phi.abc}}} \cdot \frac{N_0^2}{10^6}} = \\ = \frac{3}{4\pi \rho^3} \sqrt{\frac{3m_1 m_2}{m_3(2m_2 + m_1)}} \cdot e^{-\frac{E_2 - E_1}{R \cdot T_{\phi.abc}}} \cdot \frac{10^3}{N_0} = \\ = \frac{3}{4\pi \rho^3} \cdot \sqrt{\frac{3m_1 m_2}{m_3(2m_2 + m_1)}} \cdot e^{-\frac{Q_0}{R \cdot T_{\phi.abc}}} \cdot \frac{10^3}{N_0} \frac{\text{грмол}}{\text{литр}}, \quad (4c)$$

где  $Q_0 = E_2 - E_1$  — теплота реакции в *кал/грмол*.

Рассматриваемый нами процесс  $2A + B \rightleftharpoons 2AB$  представляет реакцию, идущую с изменением числа молекул на одну. Поэтому для константы равновесия можно применить приближенную формулу Нернста.

$$K = \frac{10^3 \cdot T_{\phi.abc}^{0,75} \cdot e^{-\frac{Q_0}{R \cdot T_{\phi.abc}}}}{0,08205} \frac{\text{грмол}}{\text{литр}}.$$

Сравнивая оба значения для  $K$ , получим:

$$\frac{10^3 \cdot T_{\phi.abc}^{0,75} \cdot e^{-\frac{Q_0}{R \cdot T_{\phi.abc}}}}{0,08205} = \frac{3}{4\pi r^3} \cdot \sqrt{\frac{3m_1 m_2}{m_3(2m_2 + m_1)}} \cdot e^{-\frac{Q_0}{R \cdot T_{\phi.abc}}} \cdot \frac{10^3}{N_0}$$

отсюда имеем:

$$r^3 = \frac{3}{4\pi} \cdot \frac{0,08205}{N_0 \cdot T_{\phi.abc}^{0,75}} \cdot \sqrt{\frac{3m_1 m_2}{m_3(2m_2 + m_1)}}$$

$$\text{или } \rho = \frac{3^{1/3} \cdot 0,08205^{1/3}}{4^{1/3} \cdot \pi^{1/3} \cdot N_0^{1/3} \cdot T_{\phi.abc}^{0,25}} \sqrt[6]{\frac{3m_1 m_2}{m_3(2m_2 + m_1)}}$$

поэтому  $\rho^5$  равно:

$$\rho^5 = \frac{3^{5/3} \cdot 0,08205^{5/3}}{4^{5/3} \cdot \pi^{5/3} \cdot N_0^{5/3} \cdot T_{\phi.abc}^{1,25}} \cdot \left( \frac{3m_1 \cdot m_2}{m_3 \cdot (2m_2 + m_1)} \right)^{5/6}$$

Подставляя это значение  $\rho^5$  в выражение для  $\frac{1}{K_1}$ , получаем:

$$\begin{aligned} \frac{1}{K_1} &= \frac{3}{16\sqrt{2}} \cdot \frac{1}{\pi r^5 \cdot \sqrt{2\pi R \cdot T_{\phi.abc}}} \cdot \sqrt{\frac{3m_1 m_2}{2m_2 + m_1}} \cdot e^{\frac{E_1}{R \cdot T_{\phi.abc}}} \cdot \frac{10^6}{N_0^2} = \\ &= \frac{3 \cdot \pi^{5/3} \cdot 4^{5/3} \cdot N_0^{5/3} \cdot T_{\phi.abc}^{1,25} \cdot 10^6 \cdot e^{\frac{E_1}{R \cdot T_{\phi.abc}}}}{16\sqrt{2} \cdot \pi^{1,5} \cdot \sqrt{2} \cdot T_{\phi.abc}^{0,5} \cdot 0,8313^{0,5} \cdot 10^4 \cdot 3^{5/3} \cdot 0,08205^{5/3} \cdot N_0^2} \times \\ &\quad \times \left( \frac{3m_1 m_2}{2m_2 + m_1} \right)^{0,5} \cdot m_3^{5/6} \cdot \left( \frac{2m_2 + m_1}{3m_1 m_2} \right)^{5/6} = \\ &= \frac{4^{2/3} \cdot \pi^{1/3} \cdot T_{\phi.abc}^{0,75} \cdot e^{\frac{E_1}{R \cdot T_{\phi.abc}}} \cdot m_3^{5/6}}{8 \cdot 3^{2/3} \cdot 0,8313^{0,5} \cdot 0,08205^{5/3} \cdot 0,6062^{1/3} \cdot 10^6} \cdot \left( \frac{2m_2 + m_1}{3m_1 m_2} \right)^{1/3} \end{aligned}$$

Полагая  $m_2 = 32$  гр/грмол,  $m_1 = 28$  гр/грмол и  $m_3 = 44$  гр/грмол, имеем:

$$\begin{aligned} \frac{1}{K_1} &= \frac{4^{2/3} \cdot \pi^{1/3} \cdot T_{\phi.abc}^{0,75} \cdot e^{\frac{E_1}{R \cdot T_{\phi.abc}}} \cdot 44^{5/6}}{8 \cdot 3^{2/3} \cdot 0,8313^{0,5} \cdot 0,08205^{5/3} \cdot 0,6062^{1/3} \cdot 10^6} \cdot \left( \frac{2 \cdot 32 + 28}{3 \cdot 28 \cdot 32} \right)^{1/3} = \\ &= 0,12 \cdot 10^{-3} \cdot T_{\phi.abc}^{0,75} \cdot e^{\frac{E_1}{R \cdot T_{\phi.abc}}} \end{aligned}$$

Величину  $\frac{E_1}{R \cdot T_{\phi.abc}}$  можно приближенно вычислить, исходя из данных Hellier, причем по вышеуказанному значению  $E_1$  будем определять для реакции горения СО следующим образом:

Допустим, что в закрытом сосуде с газовой смесью  $2\text{CO} + \text{O}_2$  начальная концентрация окиси углерода равна  $a$  и начальная концентрация кислорода равна  $b$ , причем, очевидно, что  $a = 2b$ .

Через промежуток времени  $t$  часть смеси соединилась и концентрация оставшейся окиси углерода равна  $a - 2x$ , а кислорода  $b - x$ , причем попрежнему  $a - 2x = 2(b - x)$ .

Скорость реакции соединения равна:

$$W = \frac{2dx}{dt} = K_1(a - 2x)^2 \cdot (b - x) = K_1 \frac{(a - 2x)^3}{2},$$

отсюда:

$$dt = \frac{1}{K_1} \cdot \frac{4dx}{(a - 2x)^3}.$$

Интегрируя это уравнение в пределах: для левой стороны от 0 до  $t$ , а для правой—от 0 до  $x$ , получаем:

$$t = \frac{1}{K_1} \left[ \left( \frac{1}{a - 2x} \right)^2 - \left( \frac{1}{a} \right)^2 \right].$$

Обозначим процентное количество смеси, вступившей при данной температуре  $T^\circ_{\text{ф. абс.}}$  за время  $t$  сек в соединение, через  $S\%$ ; тогда, очевидно,  $a - 2x = (1 - 0,01S\%)a$ .

Поэтому уравнение для времени  $t$  принимает вид:

$$t = \frac{1}{K_1 a^2} \left[ \left( \frac{1}{1 - 0,01S\%} \right)^2 - 1 \right] = \frac{1}{K_1 a^2} \cdot y;$$

здесь через  $y$  обозначено выражение в квадратных скобках.

Отсюда константа скорости реакций соединения  $K_1$  равна:

$$K_1 = \frac{1}{ta^2} \left[ \left( \frac{1}{1 - 0,01S\%} \right)^2 - 1 \right] = \frac{1}{ta^2} y.$$

Очевидно, что  $\lg$  отношения констант скорости реакций при различных температурах, но одинаковом времени реагирования равен:

$$\lg \frac{K_{1T_2}}{K_{1T_1}} = \lg \frac{\frac{1}{ta^2} y_{T_2}}{\frac{1}{ta^2} y_{T_1}} = \lg \frac{y_{T_2}}{y_{T_1}} = \lg y_{T_2} - \lg y_{T_1}.$$

С другой стороны, по закону Ван-Гоффа

$$\lg \frac{K_{1T_2}}{K_{1T_1}} = \frac{E_1}{2,3026R} \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right);$$

поэтому получаем:  $\frac{E_1}{2,3026R} = \frac{\lg y_{T_2} - \lg y_{T_1}}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}}$ .

Опытные данные Hellier и вычисленные из них значения  $y$  и  $\lg y$  сведем в таблицу:

$T_{\text{абс}}$	$S\%$	$y$	$\lg y$
470	0,13	0,0026	$\bar{3},4150$
575	0,44	0,0088	$\bar{3},9445$
680	3,03	0,0606	$\bar{2},7825$
775	6,20	0,1364	$\bar{1},1335$
840	14,40	0,3650	$\bar{1},5623$
875	21,10	0,6000	$\bar{1},7782$
923	40,00	1,8200	0,2600
960	46,40	2,4800	0,3945
1130	65,00	7,1500	0,8543

Подставляя значения  $\lg y$  и соответствующих температур в формулу для определения  $E_1$ , находим, что для интервала температур  $680^\circ - 1130^\circ$  абс.

$$\frac{E_1}{2,3026R} \approx 3500.$$

Поэтому:

$$e^{\frac{E_1}{R \cdot T_{\text{ф.абс}}}} = 10^{\frac{E_1}{2,3026R \cdot T_{\text{ф.абс}}}} = 10^{\frac{3500}{T_{\text{ф.абс}}}}.$$

Необходимо однако иметь в виду, что опыты Hellier производились с сухой смесью  $2\text{CO} + \text{O}_2$ . При наличии влажной смеси, по данным Диксона и Бона, скорость реакции резко возрастает, причем скорость распространения пламени от  $44 \text{ м/сек}$  для сухой смеси достигает значения  $226 \text{ м/сек}$  при влажной смеси с влажностью  $5,6\%$ .

Определим время реакции для сухой смеси  $2\text{CO} + \text{O}_2$  при температуре ее воспламенения  $650^\circ\text{C}$  ( $923^\circ$  абс.), для чего предварительно из данных Hellier находим  $S = 40\%$  и  $y = 1,82$ , тогда время  $t$  для этой реакции получается равным:

$$t_{923^\circ} = \frac{1}{K_1 a^2} y = \frac{1}{K_1 a^2} 1,82.$$

При наличии влаги реакция идет гораздо полнее и при влажности смеси с содержанием влаги  $5,6\%$  реакция при температуре  $650^\circ\text{C}$  идет до практически полного соединения  $\text{CO}$  и  $\text{O}_2$ , так что  $S$  можно принять равным  $99,95\% \div 99,975\%$ .

Поэтому  $y$  получается равным  $10^{6,6} \div 10^{7,21}$ .

Тогда время  $t_{кат}$  для этой реакции равно

$$t_{кат} = M_0 \cdot \frac{1}{K_1 a^2} y = M_0 \frac{1}{K_1 a^2} (10^{6,6} \div 10^{7,21}),$$

где  $M_0$  — катализаторный фактор.

Отношение времени реакций  $\frac{t}{t_{кат}}$  поэтому равно:

$$\frac{t}{t_{кат}} = \frac{1,82}{M_0 (10^{6,6} \div 10^{7,21})}.$$

С другой стороны, по данным Диксона и Бона

$$\frac{t}{t_{кат}} = \frac{226 \text{ м/сек}}{44 \text{ м/сек}} = 5,14.$$

Таким образом, получаем:

$$\frac{1,82}{M_0 (10^{6,6} \div 10^{7,21})} = 5,14.$$

Отсюда:

$$\begin{aligned} M_0 &= \frac{1,82}{5,14} \cdot \frac{1}{10^{6,6} \div 10^{7,21}} = \frac{1}{2,82} \cdot \frac{1}{10^{6,6} \div 10^{7,21}} = \\ &= \frac{1}{10^{0,45}} \cdot \frac{1}{10^{6,6} \div 10^{7,21}} = \frac{1}{10^{7,05} \div 10^{7,66}} = 10^{-7,05} \div 10^{-7,66}. \end{aligned}$$

Так как в топках котлов сжигание окиси углерода всегда происходит при наличии в топочном пространстве водяных паров, то окончательное значение  $e^{\frac{E_1}{R \cdot T_{ф.abc}}}$  нужно принимать с учетом катализаторного фактора, т. е.

$$e^{\frac{E_1}{R \cdot T_{ф.abc}}} = 10^{\frac{3500}{T_{ф.abc}} - 7,05} \div 10^{\frac{3500}{T_{ф.abc}} - 7,66}.$$

Для дальнейших расчетов примем первое значение  $e^{\frac{E_1}{R \cdot T_{ф.abc}}}$ .  
Следовательно:

$$\frac{1}{K_1} = 0,12 \cdot 10^{-3} T_{ф.abc}^{0,75} \cdot 10^{\frac{3500}{T_{ф.abc}} - 7,05} = 0,12 \cdot 10^{\frac{3500}{T_{ф.abc}} - 10,05} \cdot T_{ф.abc}^{0,75}.$$

Для определения времени, потребного для доведения реакции горения до заданного предела, необходимо проинтегрировать уравнение скорости реакции:

$$\frac{2dx}{dt} = K_1(a - 2x)^2(b - x) - K_2(f + 2x)^2;$$

освобождаясь от знаменателя, получим:

$$dt = \frac{2dx}{K_1[(a - 2x)^2 \cdot (b - x) - K(f + 2x)^2]}.$$



что после интегрирования дает.

$$t = \frac{2}{K_1} \int_0^x \frac{dx}{(a-2x)^2(b-x) - K(f+2x)^2} =$$

$$= \frac{2}{K_1} \int_0^x \frac{dx}{(a^2b - Kf^2) - (a^2 + 4ab + 4Kf)x + 4(a+b-K)x^2 - 4x^3} =$$

$$= \frac{2}{K_1} \int_0^x f(x) dx.$$

Применяя к нашей функции приближенную формулу интегрирования Симпсона, имеем:

$$t = \frac{2}{K_1} \cdot \frac{x}{6} \left[ f(0) + 4f\left(\frac{x}{2}\right) + f(x) \right] = \frac{2}{K_1} \cdot \frac{x}{6} \left[ \frac{1}{a^2b - Kf^2} + \right.$$

$$+ \frac{4}{(a^2b - Kf^2) - (a^2 + 4ab + 4Kf)\frac{x}{2} + 4(a+b-K)\frac{x^2}{4} - 4\frac{x^3}{8}} +$$

$$\left. + \frac{1}{(a^2b - Kf^2) - (a^2 + 4ab + 4Kf)x + 4(a+b-K)x^2 - 4x^3} \right];$$

вынося за скобку  $\frac{1}{a^2b - Kf^2}$  и производя преобразование, получаем:

$$t = \frac{2}{K_1} \cdot \frac{x}{6(a^2b - Kf^2)} \left[ 1 + \right.$$

$$+ \frac{4(a^2b - Kf^2)}{(a^2b - Kf^2) - (a^2 + 4ab + 4Kf)\frac{x}{2} + (a+b-K)x^2 - \frac{x^3}{2}} +$$

$$\left. + \frac{a^2b - Kf^2}{(a^2b - Kf^2) - (a^2 + 4ab + 4Kf)x + 4(a+b-K)x^2 - 4x^3} \right].$$

Обозначив знаменателя I дроби, заключенной в квадратные скобки, через  $F\left(\frac{x}{2}\right)$ , а II дроби через  $F(x)$  и приводя все выражения в скобках к общему знаменателю, получим:

$$t = \frac{2}{K_1} \cdot \frac{x}{6(a^2b - Kf^2)} \times$$

$$\times \left[ \frac{F\left(\frac{x}{2}\right) \cdot F(x) + 4(a^2b - Kf^2)F(x) + (a^2b - Kf^2)F\left(\frac{x}{2}\right)}{F\left(\frac{x}{2}\right) \cdot F(x)} \right].$$

Разделим всю дробь в квадратных скобках на числителя, тогда получим:

$$t = \frac{2}{K_1} \cdot \frac{x}{6(a^2b - Kf^2)} \cdot \frac{1}{4(a^2b - Kf^2)F(x) + (a^2b - Kf^2)F\left(\frac{x}{2}\right)} =$$

$$1 - \frac{F\left(\frac{x}{2}\right) \cdot F(x) + 4(a^2b - Kf^2)F(x) + (a^2b - Kf^2)F\left(\frac{x}{2}\right)}{4(a^2b - Kf^2)F(x) + (a^2b - Kf^2)F\left(\frac{x}{2}\right)}$$

$$= \frac{1}{K_1} \cdot \frac{x}{3(a^2b - Kf^2)} \cdot \frac{1}{1 - \frac{x_0}{a_0}}$$

Входящие в это уравнение концентрации  $a$ ,  $b$ ,  $x$  и  $f$  имеют следующие значения:

концентрация горючих топочных газов в дымовых газах:

$$a \frac{\text{грмол}}{\text{литр}} = \frac{V_{\text{топ.г.}}}{V'_{\text{д.г.топ}}} \cdot \frac{1}{22,414} \cdot \frac{273,2}{T_{\text{ф.абс}}} \cdot \frac{P_{T(\text{ата})}}{1,0333};$$

концентрация кислорода:

$$b \frac{\text{грмол}}{\text{литр}} = \frac{V_{\text{O}_2}}{V'_{\text{д.г.топ}}} \cdot \frac{1}{22,414} \cdot \frac{273,2}{T_{\text{ф.абс}}} \cdot \frac{P_{T(\text{ата})}}{1,0333};$$

начальная концентрация углекислоты в дымовых газах:

$$f \frac{\text{грмол}}{\text{литр}} = \frac{V''_{\text{д.г.}}}{V'_{\text{д.г.топ}}} \cdot \frac{1}{22,414} \cdot \frac{273,2}{T_{\text{ф.абс}}} \cdot \frac{P_{T(\text{ата})}}{1,0333};$$

уменьшение концентрации кислорода за время  $t$ :

$$x = \frac{V'_{\text{O}_2}}{V'_{\text{д.г.топ}}} \cdot \frac{1}{22,414} \cdot \frac{273,2}{T_{\text{ф.абс}}} \cdot \frac{P_{T(\text{ата})}}{1,0333} \text{ грмол/литр},$$

причем для твердых и жидких топлив:

$$V_{\text{топ.г.}} = 0,0186C_{\text{лет}} \% \text{ н.м}^3/\text{кг}; \quad (8)$$

$$V_{\text{O}_2} = 0,209(\alpha_m - 1)V_{\text{теор}} + 0,0186C_{\text{мех}} \% + 0,0093C_{\text{лет}} \% \cdot \text{н.м}^3/\text{кг}; \quad (9-a)$$

$$V'_{\text{O}_2} = 0,0093(C_{\text{лет}} \% - C'' \% - 2C_{\text{дым}}\%) \text{ н.м}^3/\text{кг}; \quad (10)$$

$$V''_{\text{д.г.}} = 0,0186(C_p \% - C_{\text{мех}} \% - C_{\text{лет}}\%) \text{ н.м}^3/\text{кг}; \quad (11)$$

для газообразных топлив:

$$V_{\text{топ.г.}} = 0,01[(\text{CH}_4 \% + \text{CO} \% ) + 2(\text{C}_2\text{H}_2 \% + \text{C}_2\text{H}_4 \% + \text{C}_2\text{H}_6 \% ) +$$

$$+ 3(\text{C}_3\text{H}_6 \% + \text{C}_3\text{H}_8 \% + \dots)] \frac{\text{н.м}^3}{\text{н.м}^3};$$

$$V_{\text{O}_2} = 0,209\alpha_m V_{\text{теор}} - 0,005(\text{H}_2 \% + \text{C}_2\text{H}_2 \% ) - 0,01(\text{CH}_4 \% + \text{C}_2\text{H}_4 \% ) -$$

$$- 0,015(\text{C}_2\text{H}_6 \% + \text{C}_3\text{H}_6 \% ) - 0,02\text{C}_3\text{H}_8 \% - \dots \frac{\text{н.м}^3}{\text{н.м}^3};$$

$$V'_{\text{O}_2} = V_{\text{O}_2} - 0,209(\alpha_m - 1)V_{\text{теор}} - 0,01 \cdot \frac{\text{CO}_{\text{ух}} \%}{2} - 0,0186C_{\text{дым}} \% \frac{\text{н.м}^3}{\text{н.м}^3};$$

$$V''_{\text{д.г.}} = 0,01 \cdot \text{CO}_2 \% \frac{\text{н.м}^3}{\text{н.м}^3}, \text{ где } \text{CO}_2 \% \text{ — содержание углекислоты}$$

в газообразном топливе до сгорания;

$V'_{д.г.топ}$  — объем дымовых газов в топочном пространстве от 1 кг или 1  $нм^3$  горящего топлива при нормальных условиях;

$V_{теор}$  — теоретически необходимое количество воздуха для сжигания 1 кг или 1  $нм^3$  топлива в  $нм^3/кг$  или  $\frac{нм^3}{нм^3}$ ;

$C_p\%$  — содержание углерода в рабочем топливе в %% по весу на 1 кг топлива;

$C''\%$  — потеря углерода, сгоревшего в окись, которая осталась не окисленной в дымовых газах, уходящих из топки, в %% по весу на 1 кг топлива;

$C_{мех}\%$  — потеря углерода от механической неполноты горения в %% на 1 кг топлива;

$C_{дым}\%$  — потеря углерода, уходящего в виде сажи с дымовыми газами, в %% по весу на 1 кг топлива;

$C_{лет}\%$  — содержание углерода в летучей части горящего топлива в %% по весу на 1 кг топлива;

$\alpha_m$  — коэффициент избытка воздуха в топке.

Обозначим по вышеуказанному отношению концентраций в знаменателе уравнения для определения времени горения  $t$  через  $\frac{q_3}{n'}$ , т. е.

$$1 - \frac{x_0}{a_0} = \frac{a_0 - x_0}{a_0} = \frac{q_3}{n'} = \frac{Q'_3 + Q''_3}{Q_{лет}} \cdot \frac{1}{n'}$$

где  $n'$  представляет коэффициент пропорциональности.

Для выяснения значения коэффициента пропорциональности  $n'$  обратимся к конкретным примерам (полностью указанным ниже):

1) топливо — дрова:  $C_{лет} = 24,5\%$ ;  $Q_{лет} = 81 \cdot C_{лет} = 1985 \text{ кал/кг}$ ;

потери тепла  $Q'_3 = 114 \text{ кал/кг}$ ;  $C'' = \frac{Q'_3}{56,7} = 2\%$

$$Q''_3 = 40 \text{ кал/кг}; C_{дым} = \frac{Q''_3}{81} = 0,5\%$$

По формулам (8) и (10) находим:

$$V_{топ.г.} = 0,0186 \cdot C_{лет}\% = 0,456 \text{ нм}^3/\text{кг.}$$

$$V'_{O_2} = 0,0093(C_{лет}\% - C''\% - 2C_{дым}\%) = 0,2 \text{ нм}^3/\text{кг.}$$

Начальная концентрация горючих топочных газов равна:

$$a = V_{топ.г.} \cdot \frac{1}{V'_{д.г.топ}} \cdot \frac{1}{22,414} \cdot \frac{273,2}{T_{ф.абс}} \cdot \frac{P_{Т(ата)}}{1,0333} \frac{\text{гр мол}}{\text{литр}};$$

изменение концентрации кислорода за время  $t$  сек.

$$x = V'_{O_2} \frac{1}{V'_{д.г.топ}} \cdot \frac{1}{22,414} \cdot \frac{273,2}{T_{ф.абс}} \cdot \frac{P_{г(ата)}}{1,0333} \text{ гр мол/литр};$$

поэтому отношение оставшейся концентрации горючих топочных газов к их начальной концентрации можно представить в виде отношения:

$$\frac{a_0 - x_0}{a_0} = \frac{a - 2x}{a} = \frac{V_{топ.г.} - 2V'_{O_2}}{V_{топ.г.}} = \frac{0,456 - 0,2}{0,456} = \frac{1}{8,15}.$$

Величина  $q_3$  в рассматриваемом примере равна:

$$q_3 = \frac{Q'_3 + Q''_3}{Q_{лет}} = \frac{114 + 40}{1985} = \frac{1}{12,9},$$

поэтому коэффициент пропорциональности  $n'$  получается:

$$n' = \frac{q_3}{1 - \frac{x_0}{a_0}} = \frac{1}{12,9} \cdot \frac{1}{8,15} = \frac{1}{1,58} \cong 10^{-0,2}.$$

2) Топливо—антрацит АШ—пыль:  $C_{лет} = 4,1\%$ ;  $Q_{лет} = 332 \text{ кал/кг}$ ; потери тепла:  $Q'_3 = 57 \text{ кал/кг}$ ;  $C''\% = 1\%$ ;  $Q''_3 = 0$ ;  $C_{дым} = 0\%$ .

По формулам (8) и (10) находим:

$$V_{топ.г.} = 0,076 \text{ нм}^3/\text{кг}; \quad V'_{O_2} = 0,0277 \text{ нм}^3/\text{кг},$$

поэтому

$$\frac{a_0 - x_0}{a_0} = \frac{a - 2x}{a} = \frac{V_{топ.г.} - 2V'_{O_2}}{V_{топ.г.}} = \frac{0,076 - 2 \cdot 0,0277}{0,076} = \frac{1}{3,69}.$$

Величина  $q_3$  равна:

$$q_3 = \frac{Q'_3}{Q_{лет}} = \frac{57}{332} = \frac{1}{5,825},$$

следовательно,  $n'$  равен:

$$n' = \frac{q_3}{1 - \frac{x_0}{a_0}} = \frac{1}{5,825} \cdot \frac{1}{3,69} \cong \frac{1}{1,58} = 10^{-0,2}.$$

3) Топливо—каменный уголь марки ПЖ:  $C_{лет} = 16,8\%$ ;  $Q_{лет} = 1361 \text{ кал/кг}$ .

Потери тепла:  $Q'_3 = 136 \text{ кал/кг}$ ;  $C''\% = 2,4\%$ ;

$Q''_3 = 115 \text{ кал/кг}$ ;  $C_{дым} = 1,4\%$ .

По формулам (8) и (10) находим:

$$V_{\text{топ.г.}} = 0,3125 \frac{\text{н.м}^3}{\text{кг}}; \quad V'_{0_2} = 0,111 \frac{\text{н.м}^3}{\text{кг}},$$

поэтому:

$$\frac{a_0 - x_0}{a} = \frac{V_{\text{топ.г.}} - 2V'_{0_2}}{V_{\text{топ.г.}}} = \frac{0,3125 - 2 \cdot 0,111}{0,3125} = \frac{1}{3,45}.$$

Величина  $q_3$  равна:

$$q_3 = \frac{Q'_3 + Q''_3}{Q_{\text{лет}}} = \frac{136 + 115}{1361} = \frac{1}{5,435},$$

следовательно,  $n'$  равен:

$$n' = \frac{q_3}{1 - \frac{x_0}{a_0}} = \frac{1}{5,435} : \frac{1}{3,45} \approx \frac{1}{1,58} = 10^{-0,2}.$$

4) Топливо—нефт. остатки (мазут):  $C_{\text{лет}} = 66,3\%$ ,

$$Q_{\text{лет}} = 5370 \frac{\text{кал}}{\text{кг}}.$$

Потери тепла:

$$Q'_3 = 198 \text{ кал/кг}; \quad C'' = 3,5\%$$

$$Q''_3 = 73 \text{ кал/кг}; \quad C_{\text{дым}} = 0,9\%.$$

По формулам (8) и (10) находим:

$$V_{\text{топ.г.}} = 1,231 \frac{\text{н.м}^3}{\text{кг}}, \quad V'_{0_2} = 0,5663 \frac{\text{н.м}^3}{\text{кг}},$$

поэтому

$$\frac{a_0 - x_0}{a_0} = \frac{V_{\text{топ.г.}} - 2V'_{0_2}}{V_{\text{топ.г.}}} = \frac{1,231 - 2 \cdot 0,5663}{1,231} = \frac{1}{12,5}.$$

Величина  $q_3$  равна:

$$q_3 = \frac{Q'_3 + Q''_3}{Q_{\text{лет}}} = \frac{198 + 73}{5370} = \frac{1}{19,8},$$

следовательно,  $n'$  равен:

$$n' = \frac{q_3}{1 - \frac{x_0}{a_0}} = \frac{1}{19,8} : \frac{1}{12,5} \approx \frac{1}{1,58} = 10^{-0,2}.$$

Таким образом, окончательно принимаем коэффициент пропорциональности  $n' = 10^{-0,2}$ , тогда уравнение для времени  $t$  примет вид:

$$t = \frac{1}{K_1} \cdot \frac{x}{3(a^2b - Kf^2)} \cdot \frac{n'}{q_3} = \frac{10^{-0,2}}{3 \cdot K_1} \cdot \frac{1}{q_3} \cdot \frac{x}{(a^2b - Kf^2)}.$$

Подставляя далее значения  $\frac{1}{K_1}$ ,  $x$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $f$  и  $K$  в это уравнение, имеем:

$$t = \frac{0,12 \cdot T_{\phi,abc}^{0,75} \cdot 10^{\frac{3500}{T_{\phi,abc}} - 10,05} \cdot 10^{-0,2}}{3} \cdot \frac{1}{q_3} \times$$

$$\times \frac{V'_{O_2} \cdot \frac{1}{22,414} \cdot \frac{273,2}{T_{\phi,abc}} \cdot \frac{P_{T(ama)}}{1,0333} \cdot \frac{1}{V'_{д.з.}}}{\left(\frac{V_{мон.з.}}{V'_{д.з.}}\right)^2 \left(\frac{1}{22,414} \cdot \frac{273,2}{T_{\phi,abc}} \cdot \frac{P_{T(ama)}}{1,0333}\right)^2 \cdot V_{O_2} \cdot \frac{1}{22,414} \cdot \frac{273,2}{T_{\phi,abc}} \cdot \frac{P_{T(ama)}}{1,0333} \cdot \frac{1}{V'_{д.з.}}}$$

$$- \frac{10^3 \cdot T_{\phi,abc}^{0,75} \cdot e^{-\frac{Q_0}{R \cdot T_{\phi,abc}}}}{0,08205} \left(\frac{V''_{д.з.}}{V'_{д.з.}}\right)^2 \cdot \left(\frac{1}{22,414} \cdot \frac{273,2}{T_{\phi,abc}} \cdot \frac{P_{T(ama)}}{1,0333}\right)^{2*}$$

Так как  $\frac{22,414'}{273,2} = 0,08205$ , то после сокращения получим:

$$t = 0,4 \cdot T_{\phi,abc}^{0,75} \cdot 10^{\frac{3500}{T_{\phi,abc}} - 11,25} \cdot \frac{1}{q_3} \times$$

$$\times \frac{V'_{O_2}}{\left(\frac{1}{22,414} \cdot \frac{273,2}{T_{\phi,abc}} \cdot \frac{P_{T(ama)}}{1,0333}\right)^2 \left[V_{O_2} \left(\frac{V_{мон.з.}}{V'_{д.з.}}\right)^2 - 10^3 \cdot T_{\phi,abc}^{1,75} \cdot e^{-\frac{Q_0}{R \cdot T_{\phi,abc}}} V'_{д.з.} \cdot \frac{1,0333}{P_{T(ama)}} \left(\frac{V''_{д.з.}}{V'_{д.з.}}\right)^2\right]^*};$$

здесь  $Q_0 = 135580$  кал/грмол — теплота реакции  $2CO + O_2 \rightarrow 2CO_2$  в кал/грмол,

$R = 1,987$  кал/грмол·град — газовая постоянная.

Так как величина  $10^3 \cdot T_{\phi,abc}^{1,75} \cdot e^{-\frac{Q_0}{R \cdot T_{\phi,abc}}} \cdot V'_{д.з.} \cdot \left(\frac{V''_{д.з.}}{V'_{д.з.}}\right)^2 \cdot \frac{1,0333}{P_{T(ama)}}$

значительно менее величины  $V_{O_2} \cdot \left(\frac{V_{мон.з.}}{V'_{д.з.}}\right)^2$ , то ею можно пренебречь, и тогда выражение для времени горения  $t$  примет вид:

$$t \cong 0,4 \cdot T_{\phi,abc}^{0,75} \cdot 10^{\frac{3500}{T_{\phi,abc}} - 11,25} \cdot \frac{1}{q_3} \cdot \left(\frac{1,0333}{P_{T(ama)}}\right)^2 \cdot 0,08205^2 \cdot T_{\phi,abc}^2 \times$$

$$\times \left(\frac{V'_{O_2}}{V_{O_2}}\right) \left(\frac{V'_{д.з.}}{V_{мон.з.}}\right)^2 = 0,27 \cdot 10^{\frac{3500}{T_{\phi,abc}} - 13,25} \cdot T_{\phi,abc}^{2,75} \cdot \frac{1}{q_3} \times$$

$$\times \left(\frac{V'_{O_2}}{V_{O_2}}\right) \left(\frac{V'_{д.з.}}{V_{мон.з.}}\right)^2 \left(\frac{1,0333}{P_{T(ama)}}\right)^2.$$

\*) Продолжение знаменателя дроби.

Это выражение для времени  $t$  получено для равномерно выделяющейся и однородной смеси топочных газов, находящейся в покое или протекающей ламинарным (струйчатым) движением в пределах топки. При таких условиях скорость протекания газов не оказывает влияния на время реакции. Но при работе топки газовая смесь в различных местах ее получается неоднородной и протекает турбулентным потоком, а в этом случае скорость движения газов оказывает большое влияние на интенсивность их перемешивания, и следовательно, на время реакции горения.

Влияние скорости движения на скорость реакции при растворении твердых тел в жидкостях изучено опытным путем Нойесом, Уитнеем, Бруннером, Толлочко и Нернстом.

При этом оказалось, что скорость растворения пропорциональна скорости движения (вращения)  $W$  твердого тела в степени от 0,67 (для растворения в воде и кислотах) до  $W$  в степени 0,8 (для растворения металлов в растворах  $l$  в присутствии  $Kl$ ). Такая же зависимость от скорости в степени  $0,6-2/3$  получена Росин'ым и Каузер'ом из опытов сжигания каменного угля на колосниковой решетке (см. VDI № 26, 1931. Вестник металлопромышленности № 2, 1934).

Изучение влияния скорости движения газа на скорость газовых реакций производилось инженером Тома; при этом для реакции  $NH_3 + HCl \rightleftharpoons NH_4Cl$  им установлено, что скорость реакции пропорциональна для отдельных опытов скорости движения газовой смеси в степени от 0,5 до 0,8, причем показатели 0,5 и 0,8 соответствуют случаям неустановившегося течения газов.

Для установившегося турбулентного газового потока можно в среднем считать, что скорость реакции пропорциональна скорости движения газовой смеси в степени  $2/3$ .

Принимая ту же зависимость от скорости протекания газового потока в топочном пространстве и для топочных реакций, получим для времени горения газов в топочном пространстве следующее выражение:

$$t = 0,27 \cdot 10^{\frac{3500}{T_{\phi,abc}}} \cdot T_{\phi,abc}^{2,75} \cdot \frac{1}{q_3} \left( \frac{1,0333}{P_{T(ama)}} \right)^2 \left( \frac{V'_{0,2}}{V_{0,2}} \right) \left( \frac{V'_{\partial,2}}{V_{мон.г.}} \right)^2 \frac{1}{W_{мон.г.}^{2/3}} \quad (12-a)$$

Входящая в это выражение средняя скорость протекания газов в топочном пространстве может быть определена из уравнения:

$$W_{мон.г.} \cong \frac{B \cdot V'_{\partial,2}}{3600} \cdot \frac{T_{\phi,abc}}{273,2} \cdot \frac{1,0333}{P_{T(ama)}} \cdot \frac{1}{\psi \cdot R} \quad (13)$$

где  $B$ —расход топлива в кг/час.,  $R$ —площадь колосниковой решетки в  $m^2$ , а коэффициент  $\psi$  зависит от конфигурации топки (наличие сводов, поворотов и сужений газового потока и т. п.)

Для этого коэффициента можно принять следующие приближенные значения (требующие экспериментальной проверки):  $\psi \cong 1$  для топок горизонтально и вертикально водотрубных котлов и вертикальных котлов с внутренней топкой (Ле-Шапель и др.);  $\psi = 0,9$  для топок остальных видов стационарных котлов (кроме водотрубных);  $\psi = 0,75$  для угольных топок в жаровых трубах;  $\psi = 0,85$  для паровозных топок без сводов;  $\psi = 0,8$  для паровозных топок для каменных и тощих углей и антрацитов (смесей) при наличии коротких сводов (длина свода до  $0,5b$ , где  $b$  — длина решетки в  $m$ );  $\psi = 0,7$  для паровозных угольных (смесей), антрацитовых и торфяных топок с длинными сводами (длина свода до  $0,7b$ );  $\psi = 0,5 - 0,6$  для паровозных топок для пылевидного топлива и нефтяных топок;  $\psi = 1$  для шахтных стационарных и паровозных топок, причем под  $R$  подразумевается поверхность зеркала горения.

Что же касается пылевидного топлива и нефтяных остатков, то здесь в топочном пространстве, помимо вышеуказанных гомогенных реакций между горючими газами, выделяющимися из топлива, и кислородом воздуха, идут гетерогенные реакции между твердым коксовым остатком пылинок или капелек топлива и кислородом воздуха, причем имея в виду, что выделение летучих и горение их происходит уже при достижении топливом температур  $250^\circ - 650^\circ C$ , а наиболее интенсивное горение твердого углерода идет после достижения топливом температуры  $800^\circ C$ , можно считать, что полное время горения пылевидного и нефтяного топлива складывается из двух частей: 1) времени горения топочных газов, которое определяется вышеуказанным уравнением, и 2) времени горения коксового остатка (углерода). Такого мнения держится и Нуссельт.

Для определения добавочного времени, потребного для сгорания коксового остатка, принимаем теорию Нернста.

Эта теория заключается в следующем:

На поверхности каждой пылинки или капельки топлива образуется слой горючих газов толщиной  $\delta$ , прочно связанный с частью топлива силами адсорбции; концентрация этих горючих газов в слое значительно больше, чем в газовой массе. Реагирующие горючие газы и кислород диффундируют через поверхностный слой и, встречаясь на поверхности частицы топлива, вступают в реакцию.

Таким образом, скорость гетерогенной реакции горения коксового остатка (углерода) определяется скоростью диффузии через поверхностный слой.

Обозначим через  $O \frac{cm^2}{cm^3}$  величину поверхности раздела фаз,  $\delta$   $cm$  — толщину поверхностного слоя,  $D \frac{cm^2}{сек}$  — коэффициент диффузии,  $a$   $гмол/литр$  — начальную концентрацию кислорода,  $x$   $гмол/литр$  — изменение концентрации кислорода за время  $t_1$ .



Тогда скорость реакции (точнее, скорость диффузии кислорода из газовой массы в поверхностный слой) выразится уравнением:

$$\frac{dx}{dt} = K'_1(a-x) = \frac{O \cdot D}{\delta}(a-x).$$

Это уравнение после интегрирования дает для времени реакции  $t_1$  выражение:

$$t_1 = \frac{\delta}{O \cdot D} \ln \frac{a}{a-x} = \frac{\delta}{O \cdot D} \ln \frac{1}{1-\frac{x}{a}}.$$

Так как в случае горения коксового остатка не вся частица топлива способна к реакции, а только

$$\frac{100 - L_p \% - A_p \% - W_p \%}{100}$$

часть ее, так как  $L_p \%$  — летучая часть топлива — уже выделилась в топочное пространство, где происходит ее сгорание в гомогенных реакциях,  $W_p \%$  — влага — выделилась в виде пара,  $A_p \%$  — зола — представляет негорючий остаток топлива, то скорость реакции возрастает в отношении:

$$\frac{100}{100 - L_p \% - A_p \% - W_p \%},$$

а время  $t_1$  соответственно уменьшится в отношении

$$\frac{100 - L_p \% - A_p \% - W_p \%}{100}.$$

Таким образом, для горения коксового остатка топлива имеем окончательно:

$$t_1 = \frac{100 - L_p \% - A_p \% - W_p \%}{100} \cdot \frac{\delta}{O \cdot D} \cdot \ln \frac{1}{1-\frac{x}{a}}.$$

Входящий в выражение для времени  $t_1$  коэффициент диффузии для кислорода:  $D = \frac{\mu}{\rho} \text{ см}^2/\text{сек}$ , где  $\mu$  — коэффициент вязкости, а  $\rho$   $\text{г}/\text{см}^3$  — плотность кислорода, причем

$$\mu = 9,81 \cdot 1,84 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{1,4582}{1 + \frac{T_{\phi,abc}}{273,2}} \sqrt{\frac{T_{\phi,abc}}{273,2}} \text{ г}/\text{см} \cdot \text{сек};$$

$$\rho = \frac{m}{22414} \cdot \frac{273,2}{T_{\phi,abc}} \cdot \frac{P_{T(ama)}}{1,0333} = \frac{32}{22414} \cdot \frac{273,2}{T_{\phi,abc}} \cdot \frac{P_{T(ama)}}{1,0333} \text{ г}/\text{см}^3;$$

здесь  $m$  — молек. вес (масса *гр/мол*) кислорода = 32 *гр/грмол* ; тогда:

$$D = 9,81 \cdot 1,84 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{1,4582}{1 + \frac{128}{T_{ф.абс}}} \cdot \sqrt{\frac{T_{ф.абс}}{273,2} \cdot \frac{22414}{32} \cdot \frac{T_{ф.абс}}{273,2} \cdot \frac{1,0333}{P_{Г(ата)}}} =$$

$$= 0,1263 \cdot \frac{1,4582}{1 + \frac{128}{T_{ф.абс}}} \left( \frac{T_{ф.абс}}{273,2} \right)^{1,5} \cdot \frac{1,0333}{P_{Г(ата)}} \text{ см}^2/\text{сек.} \quad (14)$$

Величина  $O \text{ см}^2/\text{см}^3$  — поверхность раздела фаз — равна поверхности частиц коксового остатка в  $1 \text{ см}^3$ ,

$$O \text{ см}^2/\text{см}^3 = 4\pi \cdot r^2 \cdot \frac{10^3}{\frac{4}{3}\pi r^3 \gamma} \cdot \frac{1}{V'_{д.з.} \cdot 10^6} \cdot \frac{273,2}{T_{ф.абс}} \cdot \frac{P_{Г(ата)}}{1,0333} =$$

$$= \frac{3}{r\gamma} \cdot \frac{1}{V'_{д.з.} \cdot 10^3} \cdot \frac{273,2}{T_{ф.абс}} \cdot \frac{P_{Г(ата)}}{1,0333},$$

где  $r \text{ см}$  — средний радиус частицы коксового остатка, равный  $0,0035 - 0,0065 \text{ см}$  для пылевидного каменноугольного топлива, причем  $r \cong 0,0035 \text{ см}$  для антрацитов при сжигании в паровозных топках и  $r \cong 0,0065 \text{ см}$  для бурых углей;  $r = 0,0065 - 0,025 \text{ см}$  для торфяной пыли;  $r \cong 0,1 \text{ см}$  для фрезерного торфа и опилок;  $r \cong 0,003 - 0,005 \text{ см}$  для нефтяных остатков при паровом распыливании и  $r = 0,002 - 0,004 \text{ см}$  для нефтяных остатков при механическом распыливании.

$\gamma \text{ гр/см}^3$  — удельный вес частицы топлива, равный  $1,2 - 1,4 \text{ гр/см}^3$  для каменноугольной пыли, причем  $\gamma = 1,2 \text{ гр/см}^3$  для бурых углей;  $\gamma = 1,5 \text{ гр/см}^3$  для антрацитов;  $\gamma = 1,9 \text{ гр/см}^3$  для коксовой пыли;  $\gamma = 0,91 - 0,94 \text{ гр/см}^3$  для нефтяных остатков;  $\gamma = 0,5 \text{ гр/см}^3$  для сухой торфяной пыли;  $\gamma = 0,35 - 0,45 \text{ гр/см}^3$  для сухих опилок;  $\gamma = 0,65 \text{ гр/см}^3$  для влажного фрезерного торфа и влажных опилок ( $W_p \cong 40\%$ ).

По данным инж. Шорина (ВТИ), определявшего толщину поверхностного слоя  $\delta$ , исходя из условий теплоотдачи на поверхности коксовой частицы по методу Ульзамера (см. Изв. ВТИ № 3, 1933 г. и № 2, 1935 г.) эта толщина зависит от размеров частицы топлива и может быть выражена следующим образом:

$$\delta \cong r \cdot \frac{1,0333}{P_{Г(ата)}} \text{ см.}$$

Так как реакция горения коксового остатка должна дойти до практической полноты сгорания, т. е. равновесия между горючей частью коксового остатка и кислородом при данной температуре, то, следовательно

$$\frac{a-x}{x} = K, \quad (15)$$

где  $K$ —константа равновесия гетерогенной реакции горения топлива при данной температуре, равная по данным Нернста для реакций,

идущих без изменения числа молекул  $\sim e^{-\frac{Q_0'}{R \cdot T_{\phi,abc}}}$ , где  $Q_0'$ —теплота реакции горения коксового остатка (углерода) в кал/грмол:  $Q_0' = 94200$  кал/грмол.

$R$ —газовая постоянная = 1,987 кал/грмол·градус. Из уравнения (15) имеем:  $x = \frac{a}{K+1}$ , а потому:  $\frac{x}{a} = \frac{1}{K+1}$ ;

$$\frac{1}{1 - \frac{x}{a}} = \frac{1}{1 - \frac{1}{K+1}} = \frac{K+1}{K} = 1 + \frac{1}{K} = 1 + \frac{1}{e^{-\frac{Q_0'}{R \cdot T_{\phi,abc}}}} = 1 + e^{\frac{Q_0'}{R \cdot T_{\phi,abc}}} \cong e^{\frac{Q_0'}{R \cdot T_{\phi,abc}}}$$

Таким образом, для определения дополнительного времени для горения коксового остатка получаем выражение:

$$t_1 = \frac{100 - L_p \% - A_p \% - W_p \%}{100} \cdot r \cdot 1,0333 \cdot \frac{r \gamma}{P_{T(ama)}} \cdot \frac{V'_{д.з.} \cdot 10^3}{P_{T(ama)}} \cdot \frac{T_{\phi,abc}}{273,2} \times \\ \times \frac{1,0333}{0,1263} \cdot \frac{1 + \frac{128}{T_{\phi,abc}}}{1,4582} \left( \frac{273,2}{T_{\phi,abc}} \right)^{1,5} \cdot \frac{P_{T(ama)}}{1,0333} \ln e^{\frac{Q_0'}{R \cdot T_{\phi,abc}}} = \\ = 9(100 - L_p \% - A_p \% - W_p \%) r^2 \gamma \left( 1 + \frac{128}{T_{\phi,abc}} \right) \sqrt{\frac{273,2}{T_{\phi,abc}}} \times \\ \times V'_{д.з.} \frac{1,0333}{P_{T(ama)}} \cdot \frac{Q_0'}{T_{\phi,abc}}$$

Вводя, как и ранее, поправку на скорость протекания газов в топочном пространстве, способствующую ускорению реакции горения коксового остатка, окончательно находим:

$$t_1 = 9(100 - L_p \% - A_p \% - W_p \%) r^2 \gamma \left( 1 + \frac{128}{T_{\phi,abc}} \right) \sqrt{\frac{273,2}{T_{\phi,abc}}} \times \\ \times V'_{д.з.} \frac{1,0333}{P_{T(ama)}} \cdot \frac{Q_0'}{T_{\phi,abc}} \cdot \frac{1}{W_{мон.з.}^{2/3}} \quad (16)$$

Поэтому полное время горения пылевидного и нефтяного топлива равно

$$t_0 = t + t_1, \quad (17-a)$$

где  $t$ —время горения летучих, выделяющихся из топлива. При вычислении времени  $t_0$  для пылевидного и нефтяного топлива по вышеуказанным уравнениям объем кислорода  $V_{O_2}$  необходимо вычислять по формуле:

$$V_{O_2} = 0,209 \alpha_m V_{теор} - 0,0093 C_{лет} \% - 0,056 (H_p \% - 0,126 O_p \%) - \\ - 0,0068 S_p \% \frac{H M^3}{K_2} \quad (9-b)$$

§ 5. Определение времени горения твердого топлива, исходя из значений констант  $K_1$  и  $K_2$ , предложенных проф. Сыркиным.

Если для констант  $K_1$  и  $K_2$  скоростей реакции диссоциации и соединения молекул газа  $AB$  воспользоваться уравнением, предложенным проф. Сыркиным (Ж. Р. Ф.-Х. О. т. 58, вып. 8, 1926 г.), то получим для рассмотренных выше бимолекулярной и тримолекулярной реакций следующие значения  $K_1$ ,  $K_2$  и  $t$ .

Для константы скорости диссоциации  $K_2$  молекул газа  $AB$  имеем при числе реагирующих молекул  $n=2$  значение:

$$\begin{aligned} K_2 &= \frac{1}{n!} \sqrt{0, (8)\pi RT_{\phi.abc}} \cdot \frac{\sigma^{n-1}}{\rho} \cdot \left(\frac{N_0}{10^3}\right)^{n-1} \cdot \sqrt{\frac{n}{m_3}} \cdot e^{-\frac{E_2}{RT_{\phi.abc}}} = \\ &= \frac{1}{2} \cdot \frac{2}{3} \sqrt{2\pi RT_{\phi.abc}} \cdot \frac{4}{3} \pi \rho^2 \cdot \frac{N_0}{10^3} \sqrt{\frac{1}{m_3}} \cdot e^{-\frac{E_2}{RT_{\phi.abc}}} = \\ &= \frac{4}{9} \pi \rho^2 \cdot \sqrt{2\pi RT_{\phi.abc}} \cdot \sqrt{\frac{1}{m_3}} \cdot e^{-\frac{E_2}{RT_{\phi.abc}}} \cdot \frac{N_0}{10^3} \frac{\text{литр}}{\text{грмол} \cdot \text{сек}} \end{aligned} \quad (6-b)$$

Для константы скорости реакции соединения  $K_1$  двух молекул газа  $A$  и одной молекулы газа  $B$  имеем при  $n_1=2$  и  $n_2=1$  значение:

$$\begin{aligned} K_1 &= \frac{1}{n_1! n_2!} \sqrt{0, (8)\pi RT_{\phi.abc}} \cdot \frac{\sigma^{n_1+n_2-1}}{\rho} \cdot \left(\frac{N_0}{10^3}\right)^{n_1+n_2-1} \cdot \sqrt{\frac{\frac{n_1}{m_1} + \frac{n_2}{m_2}}{n_1+n_2}} \times \\ &\times e^{-\frac{E_1}{RT_{\phi.abc}}} = \frac{1}{1 \cdot 2 \cdot 1} \cdot \frac{2}{3} \sqrt{2\pi RT_{\phi.abc}} \cdot \frac{16}{9} \pi^2 \rho^5 \cdot \frac{N_0^2}{10^6} \sqrt{\frac{\frac{2}{m_1} + \frac{1}{m_2}}{2+1}} \times \\ &\times e^{-\frac{E_1}{RT_{\phi.abc}}} = \frac{16}{27} \pi^2 \rho^5 \cdot \sqrt{2\pi RT_{\phi.abc}} \sqrt{\frac{2m_2 + m_1}{3m_1 m_2}} \times \\ &\times e^{-\frac{E_1}{RT_{\phi.abc}}} \cdot \frac{N_0^2}{10^6} \left(\frac{\text{литр}}{\text{грмол}}\right)^2 \frac{1}{\text{сек}} \end{aligned} \quad (7-b)$$

Отсюда константа равновесия  $K = \frac{K_2}{K_1}$  — имеет значение:

$$\begin{aligned} K &= \frac{\frac{4}{9} \pi \rho^2 \cdot \sqrt{2\pi RT_{\phi.abc}} \cdot \sqrt{\frac{1}{m_3}} \cdot \frac{N_0}{10^3} \cdot e^{-\frac{E_2}{RT_{\phi.abc}}}}{\frac{16}{27} \pi^2 \rho^5 \cdot \sqrt{2\pi RT_{\phi.abc}} \cdot \sqrt{\frac{2m_2 + m_1}{3m_1 m_2}} \cdot \frac{N_0^2}{10^6} \cdot e^{-\frac{E_1}{RT_{\phi.abc}}}} = \\ &= \frac{3}{4\pi \rho^3} \cdot \sqrt{\frac{3m_1 m_2}{m_3(m_1 + 2m_2)}} \cdot e^{-\frac{Q_0}{RT_{\phi.abc}}} \cdot \frac{10^3}{N_0} \frac{\text{грмол}}{\text{литр}} \end{aligned} \quad (4-c)$$

что точно соответствует ранее найденному значению  $K$  для тримолекулярной реакции  $2A + B \rightarrow 2AB$ .

Поэтому для  $\rho$  можно воспользоваться вышенайденным значением, подставляя которое в выражение для  $\frac{1}{K_1}$  получаем:

$$\frac{1}{K_1} = \frac{27 \cdot e^{\frac{E_1}{R \cdot T_{\phi.abc}}} \cdot 10^6 \cdot 4^{5/3} \cdot \pi^{5/3} \cdot N^{5/3} \cdot T_{\phi.abc}^{1,25}}{16\pi^2 \cdot \sqrt{2\pi} \cdot 0,8313^{0,5} \cdot 10^4 \cdot T_{\phi.abc}^{0,5} \cdot 3^{5/3} \cdot 0,08205^{5/3} \cdot N_0^2 \left( \frac{3m_1 m_2}{m_1 + 2m_2} \right)^{0,5}} \times \\ \times m_3^{5/6} \left( \frac{2m_2 + m_1}{3m_1 m_2} \right)^{5/6} = 0,486 \cdot 10^{-3} \cdot T_{\phi.abc}^{0,75} \cdot e^{\frac{E_1}{R \cdot T_{\phi.abc}}},$$

причем для  $m_3$ ,  $m_1$  и  $m_2$  принимаем прежние значения:  $m_3 = 44$  гр/грмол;  $m_1 = 28$  гр/грмол;  $m_2 = 32$  гр/грмол.

Для получения одинаковых результатов с найденным ранее значением  $t$  необходимо принять:

$$e^{\frac{E_1}{R \cdot T_{\phi.abc}}} = 10^{\frac{3500}{T_{\phi.abc}} - 7,66}.$$

Поэтому для времени  $t$  получаем значение:

$$t = \frac{0,486 \cdot 10^{-3} \cdot T_{\phi.abc}^{0,75} \cdot 10^{\frac{3500}{T_{\phi.abc}} - 7,66} \cdot 10^{-0,2} \cdot 1}{3} \cdot 0,08205^3 \cdot \left( \frac{1,0333}{P_T (ama)} \right)^2 \times \\ \times T_{\phi.abc}^2 \cdot \left( \frac{V'_{O_2}}{V_{O_2}} \right) \left( \frac{V'_{\partial.z.}}{V_{мон.з.}} \right)^2 \cdot \frac{1}{W_{мон.з.}} = 1,095 \cdot 10^{\frac{3500}{T_{\phi.abc}} - 13,66} \cdot T_{\phi.abc}^{2,75} \cdot \frac{1}{q_3} \left( \frac{V'_{O_2}}{V_{O_2}} \right) \times \\ \times \left( \frac{V'_{\partial.z.}}{V_{мон.з.}} \right)^2 \cdot \left( \frac{1,0333}{P_T (ama)} \right)^2 \cdot \frac{1}{W_{мон.з.}}. \quad (12-b)$$

Пример 1-ый.

### Стационарный вертикальный водотрубный котел.

Определить объем топочного пространства дровяной топки по данным:

Расход топлива в час  $B = 3244,84$  кг/час.

Рабочая теплотворная способность топлива  $Q_H^p = 3069$  кал/кг.

Химический состав рабочего топлива:  $C_p = 35\%$ ,  $H_p = 4,3\%$ ,

$O_p = 29,6\%$ ,  $N_p = 0,6\%$ ,  $W_p = 30\%$ ,  $A_p = 0,5\%$ ,  $L_p = 59\%$ .

Объем дымовых газов в топке от 1 кг топлива  $V'_{\partial.z.} = 5,09$  нм<sup>3</sup>/кг.

Теоретический объем воздуха для сжигания 1 кг топлива

$V_{теор} = 3,28$  нм<sup>3</sup>/кг, коэффициент избытка воздуха в топке  $\alpha_m = 1,3$ .

Потеря тепла от химической неполноты горения:  $Q'_3 = 3,7\% \cdot Q_H^p = 114$  кал/кг;  $Q''_3 = 1,3\% \cdot Q_H^p = 40$  кал/кг.

Потеря тепла от механической неполноты горения:  $Q_4 = 0,25\% \cdot Q_p^p = 8 \text{ кал/кг}$ .

Площадь колосниковой решетки  $R = 8,1 \text{ м}^2$ .

Давление в топке  $P_T = 1,03 \text{ ата}$ .

Температура топочного факела  $T_\phi = 1500^\circ \text{ абс}$ .

По известным потерям тепла находим:

количество углерода, сгорающего в окись:  $C'' = \frac{Q_3}{56,7} = \frac{114}{56,7} \cong 2\%$ ,

„ „ уходящего в виде сажи:  $C_{\text{дым}} = \frac{Q''_3}{81} = \frac{40}{81} \cong 0,5\%$ ,

„ „ теряемого в провале и уносе:  $C_{\text{мех}} = \frac{Q_4}{81} = \frac{8}{81} \cong 0,1\%$ .

Из формулы (2) находим:  $C_{\text{лет}} = L_p\% - H_p\% - O_p\% - N_p\% = 59 - 4,3 - 29,6 - 0,6 = 24,5\%$ .

Теплотворная способность горючих топочных газов равна  $Q_{\text{лет}} = 81 \cdot C_{\text{лет}}\% = 81 \cdot 24,5 = 1985 \text{ кал/кг}$ .

По формулам (8), (9-а) и (10) находим:

$V_{\text{топ. г.}} = 0,0186 \cdot C_{\text{лет}}\% = 0,0186 \cdot 24,5 = 0,456 \text{ нм}^3/\text{кг}$ ;

$V_{\text{O}_2} = 0,209 (\alpha_m - 1) + V_{\text{теор}} + 0,0186 C_{\text{мех}}\% + 0,0093 C_{\text{лет}}\% = 0,209 (1,3 - 1) 3,28 + 0,0186 \cdot 0,1 + 0,0093 \cdot 24,5 = 0,436 \text{ нм}^3/\text{кг}$ ;

$V'_{\text{O}_2} = 0,0093 (C_{\text{лет}}\% - C''\% - 2C_{\text{дым}}\%) = 0,0093 (24,5 - 2 - 2 \cdot 0,5) = 0,2 \text{ нм}^3/\text{кг}$ .

Далее находим:  $q_3 = \frac{Q'_3 + Q''_3}{Q_{\text{лет}}} = \frac{114 + 40}{1985} = \frac{1}{12,9}$ .

Из формулы (13) определяем среднюю скорость газов в топочном пространстве:

$$W_{\text{топ. г.}} = \frac{B \cdot V'_{\text{д.г.}}}{3600} \cdot \frac{T_{\phi, \text{ абс}}}{273,2} \cdot \frac{1,0333}{P_T(\text{ата})} \cdot \frac{1}{\psi \cdot R} = \frac{3244,84 \cdot 5,09}{3600} \cdot \frac{1500}{273,2} \cdot \frac{1,0333}{1,03} \cdot \frac{1}{1 \cdot 8,1} = 3,12 \text{ м/сек.}$$

Из формулы (12-а) находим время горения топочных газов:

$$t = 0,27 \cdot 10^{\frac{3500}{T_{ф.abc}} - 13,25} \cdot T_{ф.abc}^{2,75} \cdot \frac{1}{q_3} \cdot \left( \frac{V'_{O_2}}{V_{O_2}} \right) \left( \frac{V'_{д.з.}}{V_{мон.з.}} \right)^2 \left( \frac{1,0333}{P_{(ата)}} \right)^2 \cdot \frac{1}{W_{мон.з.}}$$

$$= 0,27 \cdot 10^{\frac{3500}{1500} - 13,25} \cdot 1500^{2,75} \cdot 12,9 \cdot \left( \frac{0,2}{0,436} \right) \left( \frac{5,09}{0,456} \right)^2 \cdot \left( \frac{1,0333}{1,03} \right)^2 \cdot \frac{1}{3,12^{2/3}} =$$

$$= 0,633 \text{ сек.}$$

Поэтому объем топочного пространства по формуле (3) равен:

$$\mathfrak{V} = \frac{B \cdot V'_{д.з.}}{3600} \cdot \frac{T_{ф.abc}}{273,2} \cdot \frac{1,0333}{P_{(ата)}} t = \frac{3244,84 \cdot 5,09}{3600} \cdot \frac{1500}{273,2} \cdot \frac{1,0333}{1,03} \cdot 0,633 =$$

$$= 15,95 \text{ м}^3.$$

Напряжение топочного объема по формуле (3-а) равно:

$$y_0 = \frac{B \cdot Q_n^p}{\mathfrak{V}} = \frac{3244,84 \cdot 3069}{15,95} \cong 625000 \text{ кал/м}^3 \text{ час,}$$

что соответствует работе топки с колосниковой решеткой при ручной загрузке, сопровождающейся значительными потерями тепла от неполноты горения.

Пример 2-ой.

### *Стационарный вертикально-водотрубный котел.*

Определить объем топочного пространства для топки, отапливаемой антрацитовой пылью по данным:

Расход топлива в час  $B = 17810 \text{ кг/час.}$

Рабочая теплопроизводительность топлива  $Q_n^p = 6394 \text{ кал/кг.}$

Химический состав топлива (антрацита АШ):  $C_p = 74,3\%$ ,  $H_p = 1,6\%$ ,  $O_p = 1,5\%$ ,  $N_p = 0,6\%$ ,  $W_p = 1,5\%$ ,  $A_p = 18,9\%$ ,  $S_p = 1,5\%$ ,  $L_p = 9,3\%$ . Объем дымовых газов в топке от 1 кг топлива  $V'_{д.з.} = 8,718 \text{ нм}^3/\text{кг.}$

Теоретический объем воздуха для сжигания 1 кг топлива  $V_{теор} = 7,04 \text{ нм}^3/\text{кг.}$

Коэффициент избытка воздуха в топке  $\alpha_m = 1,2$ . Потеря тепла от химической неполноты горения:  $Q'_3 = 0,9\%$ ,  $Q_n^p = 57 \text{ кал/кг.}$

$$C''\% = \frac{Q'_3}{56,6} = \frac{57}{56,7} \cong 1\%.$$

Потеря тепла от механической неполноты горения:

$$Q_4 = 6\% \cdot Q_n^p = 380 \text{ кал/кг}; \quad C_{\text{мех}} = \frac{Q_4}{81} = \frac{380}{81} = 4,7\%.$$

Давление в топке  $P_T = 1,03$  атм.

Температура топочного факела  $T_\phi = 1560^\circ$  абс.

По формулам (2), (8) и (9-b) находим:

$$C_{\text{лет}} = L_p - H_p - O_p - N_p - S_p = 9,3 - 1,6 - 1,5 - 0,6 - 1,5 = 4,1\%$$

$$V_{\text{мон. г.}} = 0,0186 \cdot C_{\text{лет}} = 0,0186 \cdot 4,1 = 0,076 \text{ нм}^3/\text{кг.}$$

$$V_{O_2} = 0,209 \alpha_m V_{\text{теор}} - 0,056 (H_p - 0,126 O_p\%) - 0,0093 C_{\text{лет}}\% - \\ - 0,0068 S_p\% = 0,209 \cdot 1,2 \cdot 7,04 - 0,056 (1,6 - 0,126 \cdot 1,5) - 0,0093 \cdot 4,1 - \\ - 0,0068 \cdot 1,5 = 1,639 \text{ нм}^3/\text{кг.}$$

$$V'_{O_2} = 0,0093 (C_{\text{лет}} - C'' - 2C_{\text{дым}}) = 0,0093 (4,1 - 1 - 0) = 0,0277 \text{ нм}^3/\text{кг.}$$

Теплопроизводительность горючих топочных газов равна:

$$Q_{\text{лет}} = 81 \cdot C_{\text{лет}}\% = 81 \cdot 4,1 = 332 \text{ кал/кг.}$$

$$q_3 = \frac{Q'_3}{Q_{\text{лет}}} = \frac{57}{332} = \frac{1}{5,825}.$$

Скорость газов в топочном пространстве определяем, принимая по чертежу сечение топочного пространства равным:

$$F_{\text{дон}} = 12,215 \cdot 6,555 = 80,4 \text{ м}^2; \quad \text{тогда } W_{\text{мон.г.}} = \frac{V_{\text{сек}}}{F_{\text{дон}}} = 3 \text{ м/сек.}$$

Уд. вес частицы топлива  $\gamma = 1,5 \text{ гр/см}^3$ ;  $r = 0,005 \text{ см.}$

Время горения топочных газов находим по формуле (12-a)

$$t = 0,27 \cdot 10^{\frac{3500}{T_\phi \text{ абс}} - 13,25} \cdot T_{\phi \text{ абс}}^{2,75} \cdot \frac{1}{q_3} \cdot \left( \frac{V'_{O_2}}{V_{O_2}} \right) \left( \frac{V'_{\text{д.г.}}}{V_{\text{мон.г.}}} \right)^2 \left( \frac{1,0333}{P_T \text{ (атм)}} \right)^2 \cdot \frac{1}{W_{\text{мон.г.}}^{1,5}} = \\ = 0,27 \cdot 10^{\frac{3500}{1560} - 13,25} \cdot 1560^{2,75} \cdot 5,825 \left( \frac{0,0277}{1,639} \right) \left( \frac{8,718}{0,076} \right)^2 \times \\ \times \left( \frac{1,0333}{1,03} \right)^2 \cdot \frac{1}{3,0^{1,5}} = 1,015 \text{ сек.}$$



Время горения коксового остатка определяем из формулы (15)

$$t_1 = 9(100 - L_p \% - A_p \% - W_p \%) \cdot r^2 \cdot \gamma \cdot \left(1 + \frac{128}{T_{\phi.abc}}\right) \sqrt{\frac{273,2}{T_{\phi.abc}}} \times \\ \times V'_{д.з.} \cdot \frac{Q'_0}{T_{\phi.abc}} \cdot \frac{1,0333}{P_{T(ama)}} \cdot \frac{1}{W_{мон.з.}^{2/3}} = \\ = 9(100 - 9,3 - 18,9 - 1,6) \cdot 0,005^2 \cdot 1,5 \cdot \left(1 + \frac{128}{1560}\right) \sqrt{\frac{273,2}{1560}} \times \\ \times 8,718 \cdot \frac{94200}{1560} \cdot \frac{1,0333}{1,03} \cdot \frac{1}{3,0^{2/3}} = 2,752 \text{ сек.}$$

Полное время горения пылевидного топлива равно:

$$t_0 = t + t_1 = 1,015 + 2,752 = 3,767 \text{ сек.}$$

Объем топочного пространства по формуле (3) равен:

$$\mathfrak{B} = \frac{BV'_{д.з.}}{3600} \cdot \frac{T_{\phi.abc}}{273,2} \cdot \frac{1,0333}{P_{T(ama)}} t_0 = \\ = \frac{17810 \cdot 8,718}{3600} \cdot \frac{1560}{273,2} \cdot \frac{1,0333}{1,03} \cdot 3,767 = 930 \text{ м}^3.$$

Напряжение топочного объема по формуле (3-а) равно:

$$y_0 = \frac{B \cdot Q'_n}{\mathfrak{B}} = \frac{BQ'_n}{\frac{BV'_{д.з.}}{3600} \cdot \frac{T_{\phi.abc}}{273,2} \cdot \frac{1,0333}{P_{T(ama)}} t_0} = \frac{3600}{V'_{д.з.}} \cdot \frac{273,2}{T_{\phi.abc}} \times \\ \times \frac{P_{T(ama)}}{1,0333} \cdot \frac{Q'_n}{t_0} = \frac{3600}{8,718} \cdot \frac{273,2}{1560} \cdot \frac{1,03}{1,0333} \cdot \frac{6394}{3,767} = 123000 \text{ кал/м}^3 \text{ час,}$$

что вполне допустимо.

Пример 3-ий.

#### Паровозный котел.

Определить объем топочного пространства для паровозной топки при отоплении углем марки ПЖ по следующим данным: Расход топлива в час  $B = 2136,36 \text{ кг/час}$ .

Рабочая теплотворная способность топлива  $Q'_n = 6800 \text{ кал/кг}$ , тепло, вносимое в топку с 1 кг топлива,  $Q = 6740 \text{ кал/кг}$  (учитывая поливку угля водой в количестве 0,1 кг/кг).

Химический состав рабочего топлива:  $C_p = 71\%$ ,  $H_p = 4,2\%$ ,  $O_p = 3,5\%$ ,  $N_p = 1,3\%$ ,  $W_p = 4\%$ ,  $A_p = 13\%$ ,  $S_p = 3\%$ ,  $L_p = 28,8\%$ . Объем дымовых газов от 1 кг топлива  $V'_{д.з.} = 9,538 \text{ н.м}^3/\text{кг}$ . Теоретический объем воздуха для сжигания 1 кг топлива  $V_{теор} \cong 7,443 \text{ н.м}^3/\text{кг}$ .

Коэффициент избытка воздуха в топке  $\alpha_m = 1,2$ .

Площадь колосниковой решетки  $R = 6,1 \text{ м}^2$ .

Давление в топке  $P_T = 1,023 \text{ атм}$ . Температура топочного факела  $T_{\phi} = 1590^{\circ} \text{ абс}$ . Условная температура горения  $T_{гор} = 1625^{\circ} \text{ Ц}$ .

К. п. д. топки  $\eta_{топ} = 0,82$ . Потери тепла от химической неполноты сгорания:  $Q_3' = 2\% \cdot Q_H^p = 136 \text{ кал/кг}$ ;  $Q_3'' = 1,7\% \cdot Q_H^p = 115 \text{ кал/кг}$ . Потеря тепла от механической неполноты горения:  $Q_4 = 13,3\% \cdot Q_H^p = 905 \text{ кал/кг}$ . Количество тепла, переданное в топке лучеиспусканием  $Q_{луч,топ} = 4141750 \text{ кал/час}$ .

По известным потерям тепла находим:  
количество углерода, сгорающего в окись:

$$C'' = \frac{Q_3'}{56,7} = \frac{136}{56,7} = 2,4\%;$$

количество углерода, уходящего в виде сажи:

$$C_{дым} = \frac{Q_3''}{81} = \frac{115}{81} = 1,4\%;$$

количество углерода, теряемого в провале, уносе и шлаках:

$$C_{мех} = \frac{Q_4}{81} = \frac{905}{81} = 11,2\%.$$

Из формулы (2) находим:  $C_{лет} = J_p\% - H_p\% - O_p\% - N_p\% - S_p\% = 28,8 - 4,2 - 3,5 - 1,3 - 3 = 16,8\%$ .

Теплотворная способность горючих топочных газов равна:

$$Q_{лет} = 81 \cdot C_{лет}\% = 81 \cdot 16,8 = 1361 \text{ кал/кг}.$$

$$q_3 = \frac{Q_3' + Q_3''}{Q_{лет}} = \frac{136 + 115}{1361} = \frac{1}{5,435}.$$

По формулам (8), (9-а) и (10) находим:

$$V_{топ.г.} = 0,0186 \cdot C_{лет}\% = 0,0186 \cdot 16,8 = 0,3125 \text{ нм}^3/\text{кг}.$$

$$V_{O_2} = 0,209(\alpha_m - 1) \cdot V_{теор} + 0,0186 \cdot C_{мех}\% + 0,0093 \cdot C_{лет} = \\ = 0,209(\alpha_m - 1) \cdot 7,443 + 0,0186 \cdot 11,2 + 0,0093 \cdot 16,8 = 0,696 \text{ нм}^3/\text{кг}.$$

$$V'_{O_2} = 0,0093(C_{лет}\% - C''\% - 2C_{дым}\%) = 0,0093(16,8 - 2,4 - \\ - 2 \cdot 1,4) = 0,111 \text{ нм}^3/\text{кг}.$$

Средняя скорость топочных газов по формуле (13) равна:

$$W_{топ.г.} = \frac{B \cdot V'_{O_2}}{3600} \cdot \frac{T_{\phi, абс}}{273,2} \cdot \frac{1,0333}{P_T(\text{атм})} \cdot \frac{1}{\psi R} = \\ = \frac{2136,36 \cdot 9,538}{3600} \cdot \frac{1590}{273,2} \cdot \frac{1,0333}{1,023} \cdot \frac{1}{0,8 \cdot 6,1} = 6,75 \text{ м/сек}.$$

Время горения топочных газов находим по формуле (12-а):

$$t = 0,27 \cdot 10^{\frac{3500}{T_{ф.абс}} - 13,25} \cdot T_{ф.абс}^{2,75} \cdot \frac{1}{q_3} \left( \frac{V'_{O_2}}{V_{O_2}} \right) \left( \frac{V'_{д.г.}}{V_{мон.г.}} \right)^2 \left( \frac{1,0333}{P_{Г(ата)}} \right)^2 \times$$

$$\times \frac{1}{W_{мон.г.}} = 0,27 \cdot 10^{\frac{3500}{1590} - 13,25} \cdot 1590^{2,75} \times$$

$$\times 5,435 \cdot \left( \frac{0,111}{0,696} \right) \left( \frac{9,538}{0,3125} \right)^2 \cdot \left( \frac{1,0333}{1,023} \right)^2 \cdot \frac{1}{6,75^{2/3}} = 0,348 \text{ сек.}$$

Из формулы (3) находим объем топочного пространства:

$$\mathfrak{V} = \frac{B \cdot V'_{д.г.}}{3600} \cdot \frac{T_{ф.абс.}}{273,2} \cdot \frac{1,0333}{P_{Г(ата)}} t = \frac{2136,36 \cdot 9,538}{3600} \cdot \frac{1590}{273,2} \cdot \frac{1,0333}{1,023} \cdot 0,348 =$$

$$= 11,45 \text{ м}^3.$$

При этом напряжение топочного объема равно:

$$y_0 = \frac{B \cdot Q'_H}{\mathfrak{V}} = \frac{2136,36 \cdot 6800}{11,45} = 1270000 \text{ кал/м}^3 \text{ час,}$$

что для паровозной топки вполне допустимо.

Определим еще объем топки по эмпирической формуле инж. Гурвича:

$$Q_{луч.топ} = B \cdot Q \cdot \eta_{мон.} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{\xi \cdot x \cdot \epsilon \cdot T_{гор}^2} \sqrt{\frac{B \cdot Q \cdot \eta_{мон.}}{\mathfrak{V}}}};$$

$$4141750 = 2136,36 \cdot 6740 \cdot 0,82 \times$$

$$\times \frac{1}{1 + \frac{1}{0,16 \cdot 10^{-3} \cdot 1,35 \cdot 0,95 \cdot 1625^2} \sqrt{\frac{2136,36 \cdot 6740 \cdot 0,82}{\mathfrak{V}}}}$$

Отсюда имеем:

$$\frac{4141750}{2136,36 \cdot 6740 \cdot 0,82} = \frac{1}{1 + \frac{3420}{542\sqrt{\mathfrak{V}}}}$$

или

$$0,351 = \frac{1}{1 + \frac{6,3}{\sqrt{\mathfrak{V}}}}$$

Поэтому:

$$\mathfrak{V} = \left( \frac{6,3}{\frac{1}{0,351} - 1} \right)^2 = 11,7 \text{ м}^3,$$

что почти совпадает с найденным выше.

Пример 4-ый.

*Паровозный котел.*

Определим объем топочного пространства паровозной топ-ки, отапливаемой нефтяными остатками, по данным:

Расход топлива в час  $B = 505,15 \text{ кг/час}$ .

Рабочая теплопроизводительность топлива  $Q_n^p = 9823 \text{ кал/кг}$ .

Химический состав топлива:

$$C_p = 86\%; H_p = 12\%, O_p = 1,65\%,$$

$$N_p = 0,05\%, A_p = 0,3\%, J_p = 80\%.$$

Расход пара на форсунку  $W_\phi = 0,2 \text{ кг/кг}$ .

Объем дымовых газов от 1 кг топлива  $V'_{д.г.} = 14,155 \text{ нм}^3/\text{кг}$

Теоретический объем воздуха для сжигания 1 кг топлива

$$V_{теор} = 10,818 \text{ нм}^3/\text{кг}.$$

Коэффициент избытка воздуха в топке  $\alpha_m = 1,2$ .

Давление в топке  $P_T = 1,023 \text{ ата}$ .

Температура топочного факела  $T_\phi = 1613^\circ \text{ абс}$ .

Потери тепла от хим. неполноты горения:

$$Q'_3 = 2\% \cdot Q_n^p = 198 \text{ кал/кг};$$

$$Q''_3 \cong 0,75\% \cdot Q_n^p = 73 \text{ кал/кг}.$$

По известным потерям тепла находим:

$$\text{Количество углерода, сгорающего в окись } C''\% = \frac{Q'_3}{56,7} = \frac{198}{56,7} = 3,5\%;$$

$$\text{" " " уходящего в виде сажи } C_{дым}\% = \frac{Q''_3}{81} =$$

$$= \frac{73}{81} \cong 0,9\%.$$

$$\text{Из формулы (2) находим: } C_{лет} = J_p\% - H_p\% - O_p\% - N_p\% = \\ = 80 - 12 - 1,65 - 0,05 = 66,3\%.$$

Теплопроизводительность горючих топочных газов равна:

$$Q_{лет} = 81 \cdot C_{лет}\% = 81 \cdot 66,3 = 5370 \text{ кал/кг}.$$

По формуле (8), (9-b) и (10) находим:

$$V_{\text{топ.г}} = 0,0186 \cdot C_{\text{лет}} \% = 0,0186 \cdot 66,3 = 1,231 \text{ нм}^3/\text{кг.}$$

$$V_{O_2} = 0,209 \cdot \alpha_m \cdot V_{\text{теор}} - 0,056(H_p - 0,126 \cdot O_p \%) - 0,0093 \cdot C_{\text{лет}} \% - \\ - 0,0068 S_p \% = 0,209 \cdot 1,2 \cdot 10,818 - 0,056(12 - 0,126 \cdot 1,65) - \\ - 0,0093 \cdot 66,3 - 0,0068 \cdot 0 = 1,443 \text{ нм}^3/\text{кг.}$$

$$V'_{O_2} = 0,0093(C_{\text{лет}}^0/0 - C''^0/0 - 2 \cdot C_{\text{дым}}^0/0) = 0,0093(66,3 - 3,5 - 0,9) = \\ = 0,5663 \text{ нм}^3/\text{кг.}$$

Далее имеем:  $q_3 = \frac{Q'_3 + Q''_3}{Q_{\text{лет}}} = \frac{198 + 73}{5370} = \frac{1}{19,8}$ .

Скорость дымовых газов в топке находим из формулы (13), принимая  $u_{\text{усл.}} = \frac{B}{R} = 200 \text{ кг/м}^2 \text{ час}$ ,

$$W_{\text{топ.г.}} = \frac{B \cdot V'_{\text{д.г.}}}{3600} \cdot \frac{T_{\text{ф.абс}}}{273,2} \cdot \frac{1,0333}{P_1(\text{атм})} \cdot \frac{1}{\psi \cdot R} = \frac{u \cdot V'_{\text{д.г.}}}{3600} \cdot \frac{T_{\text{ф.абс}}}{273,2} \cdot \frac{1,0333}{1,023} \cdot \frac{1}{\psi} = \\ = \frac{200 \cdot 14,155}{3600} \cdot \frac{1613}{273,2} \cdot \frac{1,0333}{1,023} \cdot \frac{1}{0,55} = 8,44 \text{ м/сек.}$$

Время горения топочных газов по формуле (12-a) равно:

$$t = 0,27 \cdot 10^{\frac{3500}{T_{\text{ф.абс}} - 13,25}} \cdot T_{\text{ф.абс}}^{2,75} \cdot \frac{1}{q_3} \cdot \left( \frac{V'_{O_2}}{V_{O_2}} \right) \left( \frac{V'_{\text{д.г.}}}{V_{\text{топ.г.}}} \right)^2 \left( \frac{1,0333}{P_1(\text{атм})} \right)^2 \cdot \frac{1}{W_{\text{топ.г.}}} = \\ = 0,27 \cdot 10^{\frac{3500}{1613} - 13,25} \cdot 1613^{2,75} \cdot 19,8 \cdot \left( \frac{0,5663}{1,443} \right) \left( \frac{14,155}{1,231} \right)^2 \left( \frac{1,0333}{1,023} \right)^2 \times \\ \times \frac{1}{8,44^{2/3}} = 0,279 \text{ сек.}$$

Время горения коксового остатка находим из формулы (16), принимая  $r = 0,004 \text{ см}$ .

$$t_1 = 9(100 - L_p \% - A_p \% - W_p \%) \cdot r^2 \cdot \gamma \cdot \left( 1 + \frac{128}{T_{\text{ф.абс}}} \right) \cdot \sqrt{\frac{273,2}{T_{\text{ф.абс}}}} \times \\ \times V'_{\text{д.г.}} \cdot \frac{Q'_0}{T_{\text{ф.абс}}} \cdot \frac{1,0333}{P_1(\text{атм})} \cdot \frac{1}{W_{\text{топ.г.}}^{2/3}} = 9(100 - 80 - 0,3 - 0) \cdot 0,004^2 \cdot 0,92 \times \\ \times \left( 1 + \frac{128}{1613} \right) \sqrt{\frac{273,2}{1613}} \cdot 14,155 \cdot \frac{94200}{1613} \cdot \frac{1,0333}{1,023} \cdot \frac{1}{8,44^{2/3}} = 0,241 \text{ сек.}$$

Полное время горения нефтяных остатков равно:

$$t_0 = t + t_1 = 0,279 + 0,241 = 0,52 \text{ сек.}$$

Объем топочного пространства по формуле (3) равен:

$$\mathfrak{Z} = \frac{B \cdot V'_{д.г.}}{3600} \cdot \frac{T_{ф.абс}}{273,2} \cdot \frac{1,0333}{P_{I(атм)}} \cdot t_0 = \frac{505,15 \cdot 14,155}{3600} \cdot \frac{1613}{273,2} \cdot \frac{1,0333}{1,023} \cdot 0,52 = 6,09 \text{ м}^3.$$

Напряжение топочного объема равно:

$$y_0 = \frac{BQ'_н}{\mathfrak{Z}} = \frac{505,15 \cdot 9823}{6,09} = 813000 \text{ кал/м}^3 \text{ час,}$$

что для паровозной топки допустимо.

---

