

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПЛАМЕНИ ВОДЯНОГО ГАЗА

Н. Н. НОРКИН и Г. Д. СПЕЦЦИ

Введение

В довольно обширной литературе, описывающей методы и результаты экспериментального и теоретического исследования химического состава газового пламени, мы не нашли материалов, касающихся пламени водяного газа; в большинстве случаев таким исследованиям подвергались пламена светильного или искусственно создаваемых смесей горючих газов. Это послужило одной из причин постановки опытов по исследованию пламени водяного газа. Кроме того, следует указать, что нельзя еще до сих пор считать окончательно решенным вопрос о большей или меньшей горючести индивидуальных газов в сложной газовой смеси, точнее говоря, существуют различные точки зрения по вопросу о предпочтительном выгорании различных газов, находящихся в смеси; поэтому полученные нами результаты исследования могут явиться дополнительным фактическим материалом, подкрепляющим определенную точку зрения. Это обстоятельство также послужило одной из причин постановки опытов по исследованию пламени водяного газа. Наконец, мы полагаем, что результаты нашего исследования могут иметь существенное практическое значение во всех случаях, когда имеет место двухконусное горение водяного газа, т. е. в условиях применения атмосферных горелок, когда в горючей смеси количество первичного воздуха составляет лишь известную долю от теоретически необходимого количества воздуха для полного горения, например, при сжигании водяного газа на заводах, производящих электролампы, где огневая обработка деталей и сборка электроламп осуществляется с помощью атмосферных горелок, а также в лабораториях, использующих водяной газ и др. Как известно, при истечении из горелок газовой смеси, состоящей из горючего газа и первичного воздуха, имеющегося в смеси в количестве, недостаточном для полного горения, образуется стационарное двухконусное пламя, два фронта пламени.

На поверхности первого внутреннего конуса сгорает часть газа, в соответствии с количеством кислорода первичного воздуха, при этом выгорает весь кислород первичного воздуха; на поверхности второго внешнего конуса сгорает оставшая часть газа за счет диффузии кислорода из атмосферного воздуха. Сказанное выше иллюстрируется схемой на рисунке 1.

Высота конусов горения зависит главным образом от скорости распространения пламени, состава смеси, скорости истечения, диаметра горелки и др. факторов. Подробно этот вопрос будет освещен в одном из следующих сообщений в связи с результатами экспериментального исследования устойчивости горения, в зависимости от соотношения между скоростью истечения и скоростью распространения пламени. В настоящем сообщении освещен вопрос об исследовании химического состава пламенных газов, проходящих через поверхность внутреннего конуса горения.

До 1890 года существовало общепринятое мнение, что в пространстве между внутренним и внешним конусами развивается горение, начавшееся на поверхности внутреннего конуса. В то время не являлось общепринятым представление о двойственном характере пламени, согласно которому газ лишь частично сгорает на поверхности внутреннего конуса и полностью—на поверхности внешнего конуса.

В 1891—92 гг. Н. Теклю, А. Смителъс и Г. Ингль одновременно и независимо друг от друга впервые провели опыты по разделению факела пламени, отделили внутренний конус от внешнего и исследовали состав межконусных газов; эти исследования послужили основанием современных представлений о структуре пламени.

Н. Теклю произвел разделение пламени каменноугольного светильного газа и описал качественную сторону процесса разделения; в его сообще-

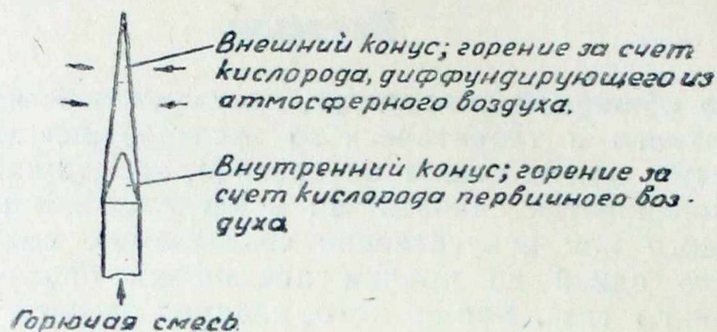


Рис. 1

щении не приводится сведений о составе исходного газа, о составе межконусных газов и о количестве первичного воздуха в исходной горючей смеси. Однако, несмотря на отсутствие этих количественных характеристик, ценным в исследовании Теклю является самый факт разделения пламени, а также определенное заключение Теклю о том, что в „промежуточном пространстве между двумя конусами не происходит горения“.

А. Смителъс и Г. Ингль приводили опыты по разделению пламени светильного каменноугольного газа и различных отдельно взятых углеводородов (этилена, метана, пентана, гептана, бензола). Они исследовали состав межконусных газов, что дает возможность сделать ряд выводов, касающихся количественной стороны. Так, например, важно отметить, что в опытах этих исследователей при сжигании светильного газа на 1 объем газа приходилось 4.8 объема первичного воздуха в исходной горючей смеси, т. е. сжигание производилось при таком количестве первичного воздуха, которое почти равно теоретически необходимому для полного сжигания (более определенно сказать нельзя ввиду отсутствия данных о химическом составе исходного газа). Несмотря на большое количество первичного воздуха, в межконусных газах не обнаружено кислорода, кислород весь выгорел в первом конусе. Состав межконусных газов следующий:

CO_2 —4.2%; CO —8.8%; H_2 —9.3%; H_2O —16.0% и N_2 —62.0 %.

Теплотворная способность межконусных газов приблизительно $500 \frac{\text{ккал}}{\text{м}^3}$

(подсчитано нами по составу газов). Результаты исследования Смителъса и Ингля в значительной степени повлияли на решение вопроса о том, что в первую очередь выгорает из горючей смеси: водород или углеводороды? Из материалов исследования Смителъса и Ингля вытекает, что как при горении светильного газа, так даже и при горении чистого метана в составе межконусных газов отсутствуют углеводороды. Это обстоятельство, казалось бы, дает основание утверждать, что углеводороды (например, CH_4) выгорают преимущественно по сравнению с CO и H_2 . Однако,

как будет видно из последующего, исчезновение углеводородов (например метана) вряд ли означает полное их сгорание до CO_2 и H_2O , а скорее всего означает лишь первоначальное превращение до CO и H_2 и затем уже, при наличии кислорода, последующее выгорание CO и H_2 до продуктов полного горения. Если бы в опытах Смительса и Ингля не было такого большого количества первичного воздуха, а было бы значительно меньшее (например, столько воздуха, сколько требуется для превращения CH_4 до CO и H_2 или немного больше), тогда имелся бы достаточный материал для решения вопроса о том, что же происходит в первую очередь: полное горение углеводородов или только превращение их до CO и H_2 ?

Решению вопроса о предпочтительном выгорании индивидуальных газов, о большей или меньшей силе химического сродства газов к кислороду в процессе горения посвящены также обстоятельные исследования Бунзена, Диксона, Горстмана, Ландольта, Мистели, Бона, Друджмана, Бона совместно с Дэвисом и Греем. Считаю необходимым вкратце остановиться на освещении этого вопроса.

В 1853 году Бунзен выполнил серию опытов по сжиганию в эвдиометре газовых смесей, состоящих из 100 объемов O_2 , 200 объемов H_2 и меняющегося в каждом опыте количества CO от 793.8 до 74 объемов. Результаты опытов Бунзена представлены в таблице 1.

Результаты опытов, приведенные в таблице 1, дают основание сделать выводы:

1. Распределение кислорода при горении между водородом с образованием H_2O и между окисью углерода с образованием CO_2 не остается постоянным

$$\frac{(\text{O}_2)_\text{H}}{(\text{O}_2)_\text{CO}} \neq \text{const},$$

а изменяется в зависимости от соотношения в газе $\frac{\text{CO}}{\text{H}_2}$.

2. При уменьшении концентрации одного из газов в смеси (например CO) уменьшается также и доля O_2 , пошедшего на сжигание CO , но это уменьшение доли O_2 не пропорционально уменьшению CO в исходной смеси. Если бы уменьшение расхода O_2 на горение CO было пропорциональным уменьшению CO в смеси, то в координатах $\alpha = \frac{\text{CO}}{\text{H}_2}$ и $\beta = \frac{\text{CO}_2}{\text{H}_2\text{O}}$ получили бы прямую линию, в действительности же этого нет, как это видно из рис. 2 (построенного нами по данным таблицы 1).

В. Бон, анализируя результаты опытов Бунзена, считает, что Бунзен выдвинул ошибочное представление о том, что при горении газов принцип Бертолле—принцип действия масс не соблюдается и что горение сопровождается скачкообразным (*per saltem*) нарушением принципа пропорциональности действующим массам. В 1874 году Мейер делал опыты, сходные с опытами Бунзена, и считал полученные им результаты подтверждением результатов Бунзена. В 1880 г., спустя 13 лет, после окончательного установления Гульдбергом и Вааге закона действующих масс, Диксон и Горстман независимо друг от друга произвели опыты по сжиганию смесей CO , H_2 и O_2 и нашли, что при горении этих смесей распределение кислорода между горючими CO и H_2 подчиняется закону действующих масс.

В. Бон считает опыты Бунзена дефектными в том отношении, что Бунзен работал с влажным эвдиометром и при различных температурах начальных смесей, вследствие чего насыщенность газовых смесей водяными парами была различной, так, II, IV, VI, VII, IX опыты проводились при температуре смеси от 2.3 до 7°C; опыты I, III, V, VIII—при температуре

Таблица 1

Результаты опытов Буязена по сжиганию смесей CO, H₂ и O₂

Опыты	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	Примечание
Число объемов в горючей смеси	$\left\{ \begin{array}{l} \text{O}_2 \dots\dots\dots 100 \\ \text{H}_2 \dots\dots\dots 200 \\ \text{CO} \dots\dots\dots 793.8 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 100 \\ 200 \\ 575.0 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 100 \\ 200 \\ 448.6 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 100 \\ 200 \\ 294.7 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 100 \\ 200 \\ 174.0 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 100 \\ 200 \\ 119.3 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 100 \\ 200 \\ 80.7 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 100 \\ 373.3 \\ 315.1 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 100 \\ 200 \\ 74 \end{array} \right.$	Заимствовано из книги Бон и Тоуненд „Пламя и горение в га- зах,“ 1927
Отношение CO ₂ : H ₂ O в продуктах горения	2.0	1.0	1.0	0.5	0.33	0.33	0.25	0.25	0.167	
Распределение O ₂ в проц. между	$\left\{ \begin{array}{l} \text{H}_2 \dots\dots\dots 33.3 \\ \text{CO} \dots\dots\dots 66.7 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 50 \\ 50 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 50 \\ 50 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 66.7 \\ 33.3 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 75.0 \\ 25 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 75.0 \\ 25.0 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 80.0 \\ 20.0 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 80.0 \\ 20.0 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 86.0 \\ 14.0 \end{array} \right.$	Вычислено авторами статьи
Сгорело объемов	$\left\{ \begin{array}{l} \text{H}_2 \dots\dots\dots 33.3 \\ \text{CO} \dots\dots\dots 66.7 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 50 \\ 50 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 50 \\ 50 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 66.7 \\ 33.3 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 75.0 \\ 25.0 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 75.0 \\ 25.0 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 80.0 \\ 20.0 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 80.0 \\ 20.0 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 86.0 \\ 14.0 \end{array} \right.$	
Осталось объемов	$\left\{ \begin{array}{l} \text{H}_2 \dots\dots\dots 166.7 \\ \text{CO} \dots\dots\dots 727.1 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 150 \\ 525 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 150 \\ 398.6 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 133.3 \\ 261.4 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 125.0 \\ 149.0 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 125.0 \\ 94.3 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 120.0 \\ 60.7 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 293.3 \\ 295.1 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 114.0 \\ 60.0 \end{array} \right.$	
Отношение $\frac{\text{CO}}{\text{H}_2}$, в горючей смеси	3.97	2.87	2.24	1.47	0.87	0.59	0.40	0.85	0.37	
Отношение $\frac{\text{CO}}{\text{H}_2}$, оставшихся не- сгоревшими	4.37	3.5	2.66	1.96	1.19	0.75	0.56	1.01	0.53	

22—23°C. Вследствие различного содержания водяного пара в исходных смесях Бунзен получил результаты распределения кислорода, якобы колебавшие принцип пропорциональности действующим массам. Вполне соглашаясь с оценкой В. Бона, все же необходимо отметить, что из любого опыта Бунзена вытекает заключение о преимущественном вы-

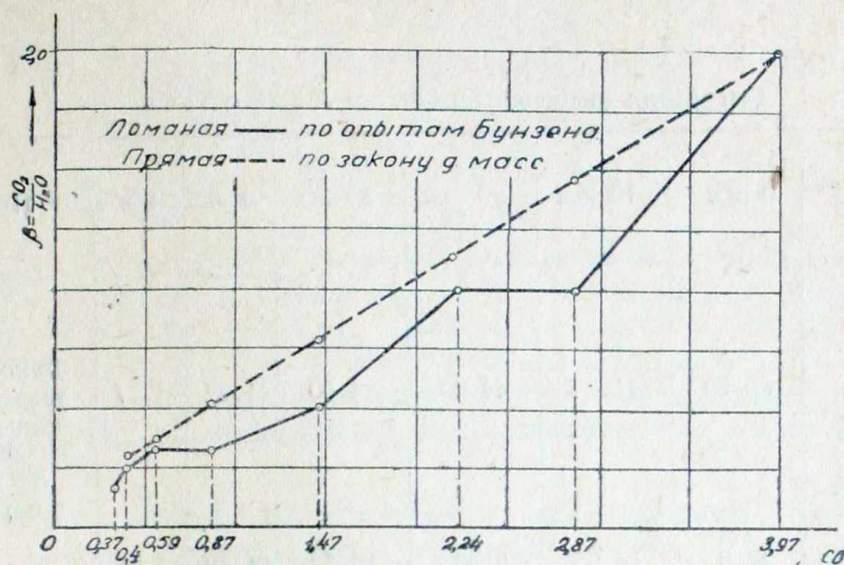


Рис. 2 Распределение O_2 между CO и H_2O по опытам Бунзена.

Рис. 2

горании H_2 по сравнению с CO . Например, первый опыт показывает отношение в горючей смеси $\frac{CO}{H_2} = 3.97$ и в продуктах горения оставшиеся H_2 и CO находятся в отношении $\frac{CO}{H_2} = 4.37$; в последнем девятом опыте отношение в горючей смеси $\frac{CO}{H_2} = 0.37$ и в продуктах горения $\frac{CO}{H_2} = 0.53$ и т. д.

Исследованию вопроса об очередности выгорания индивидуальных газов в сложной горючей смеси посвящена также работа Г. Ландольта, выполненная в 1856 году. В качестве горючего был взят каменноугольный светильный газ. Сжигание газа производилось в открытой горелке за счет диффузии атмосферного воздуха, т. е. без участия первичного воздуха, следовательно, горение было одноконусным. Из факела пламени по оси горелки отбирались пробы газа для анализа на различных высотах от устья горелки, именно на высоте 0, 10, 30, 20, 40 и 50 мм; высота пламени поддерживалась постоянной и равной 100 мм. Анализируя результаты опытов Ландольта, можно сделать следующие выводы:

1. По мере удаления точки отбора пробы газа от устья горелки количество подсосанного из атмосферы воздуха увеличивается: так, при отборе на высоте 0 мм от устья горелки отношение $\frac{\text{воздух}}{\text{газ}} = \frac{27.08}{100}$, при отборе на высоте 50 мм отношение $\frac{\text{воздух}}{\text{газ}} = \frac{381.66}{100}$, при этом следует заметить, что этому отношению соответствует приблизительно 50% воздуха от теоретически необходимого для полного горения.

2. Выгорание водорода по высоте пламени неравномерное. В нижних слоях пламени, где приток воздуха из атмосферы наименьший, выгорание водорода довольно быстрое; в верхних слоях пламени, где приток воздуха из атмосферы увеличивается по мере удаления точки отбора пробы газа от устья горелки, выгорание водорода замедляется; это иллюстрируется данными в таблице 2.

Выгорание водорода по опытам Ландольта

Таблица 2

Высота отбора пробы газа над устьем горелки	0 мм	10 мм	20 мм	30 мм	40 мм	50 мм	Примечание
Содержание водорода в газовой смеси в объемах	39.30	41.04	44.00	44.00	41.37	41.37	Данные для составления этой таблицы заимствованы нами из книги Бона и Тоуэнда.
Содержание водорода в продуктах горения в пламени в объемах	22.6	14.95	5.49	15.54	14.50	11.95	
	Быстрое выгорание водорода			Медленное выгорание водорода			

3. Выгорание метана по высоте пламени также неравномерное. В нижних слоях пламени выгорание (исчезновение) метана медленное, но более или менее равномерное, в верхних же слоях резкое и быстрое исчезновение; так, отношение остаток CH_4 в пламени — начальное к-во CH_4 в смеси $= 0.83 — 0.74 — 0.74 — 0.56 — 0.31 — 0.09$.

медленное выгорание метана
быстрое выгорание метана

4. Содержание CO в продуктах горения в пламени во всех точках отбора пробы газа по оси пламени превышает количество CO в исходных горючих смесях. Особенно резкое увеличение CO в пламени происходит в 6-й точке отбора (50 мм от устья горелки), где в продуктах горения наименьшее количество метана в пламени. В этой точке содержание CO увеличивается от 5.56 объемов в исходной смеси до 25.14 объема в пламенных газах.

На основании своих опытов Ландольт сделал вывод, что “газы исчезают в пламени по степени их горючести. Из всех других газов водород удаляется быстрее всех; немного медленнее исчезает метан и, наконец, тяжелые углеводороды, горение которых происходит преимущественно в верхней половине пламени”. По поводу этого вывода В. Бон замечает, что истинный ход реакции горения в опытах Ландольта замаскирован каталитическим воздействием платиновой трубки, через которую отводился газ для анализа и которая была во время отбора проб раскалена докрасна. Между тем известно, что в присутствии платинового катализатора (трубки) водород выгорает селективно.

К этому заключению В. Бона следует добавить, что резкое увеличение CO при уменьшении CH_4 в пламени указывает на то, что в пламени при недостатке воздуха происходит не горение CH_4 , а превращение метана в CO и H_2 , и что это превращение, повидимому, совершается в пер-

вую очередь, а затем уже горение СО и Н₂. На такую мысль наводят также и опыты А. Смительса и Г. Ингля, о чем было сказано выше (стр. 5).

В 1861 году Керстеном были опубликованы результаты его опытов по взрыву смеси этилена с электролитическим газом такого состава: С₂Н₄ — 5.48 см³, Н₂ — 15.40 см³, О₂ — 7.70 см³, N₂ — 0.22 см³. В результате взрыва получены продукты: С₂Н₄ — 0.38 см³, СО — 10.50 см³, Н₂ — 20.70 см³ и N₂ — 0.22 см³. Из этого видно, что приблизительно 93% этилена превратилось

в СО и Н₂ $\left(\frac{5.48 - 0.38}{5.48} 100 = 93\% \right)$; что же касается Н₂, то около 68% его осталось несгоревшим $\left(\frac{20.70 - 5.48 \cdot 2 - 0.38 \cdot 2}{15.40} \cdot 100 = 68\% \right)$. Керстен

сделал вывод, что прежде выгорания водорода весь углерод этилена сгорит до окиси углерода и затем избыток кислорода распределится между СО и Н₂. В 1874 году Мейер получил результаты, подтверждающие в основном выводы Керстена. Мистели высказал в 1905 году мысль о том, что в пламени кислород реагирует не с углеводородами, как таковыми, а с продуктами их разложения (С и Н), причем в первую очередь выгорает углерод.

В последнее время обстоятельные исследования были выполнены В. Бонм с его сотрудниками для решения вопроса об относительной горючести углеводородов, водорода и окиси углерода в газовом пламени. В 1906 году Бон и Друджмен (Бон и Тоуненд „Пламя и горение в газах“, 1927) взрывали смеси состава — С₂Н₆ + О₂; С₂Н₄ + Н₂ + О₂; С₂Н₂ + 2Н₂ + О₂. Эти смеси содержали одинаковые количества углерода, водорода и кислорода, т. е. 2С, 6Н, 2О. В результате взрыва оказалось, что для смеси этан-кислород в продуктах взрыва обнаружены: свободный углерод, окись углерода, метан, водород и водяной пар в довольно значительных количествах. Для смеси этилен-кислород в продуктах взрыва совершенно нет свободного углерода и лишь 10% кислорода расходуется на образование водяного пара. Для смеси ацетилен-кислород в продуктах взрыва не обнаружено ни свободного углерода, ни водяного пара, весь кислород израсходован на образование СО. Авторы исследования пришли к выводу, что углеводороды получают в пламени большую часть или даже весь кислород, а водород остается свободным, т. е. в пламени сродство углеводородов к кислороду значительно превосходит сродство водорода с кислородом.

Затем в 1915 году Бон, Дэвис и Грей взрывали смесь из метана и электролитического газа состава СН₄ — О₂ — 2Н₂. Взрывы производились при различных начальных давлениях смесей (18.33 — 19.62 — 48.85 — 17.12 — 18.31 — 26.12 атм). В результате оказалось: 1) отложения свободного углерода не обнаружено, 2) количество непрореагировавшего метана незначительно (2.80 — 5.25), 3) распределение кислорода между метаном и водородом следующее: от 95.7 до 97.2% О₂ идет к метану и от 2.8 до 5.25% О₂ идет к водороду.

На основании этих результатов исследований Бон и его сотрудники приходят к выводу, что во взрывном пламени сродство метана к кислороду в 20—30 раз сильнее сродства водорода к кислороду. По поводу такого заключения Уилер возражал, говоря, что кислород по необходимости должен соединяться с метаном, дабы образовалась такая смесь метан-кислород, которая имела бы скорость распространения пламени такую же, что и скорость распространения пламени смеси водород-кислород (известно, что содержанием горючего в смеси определяется скорость распространения пламени).

В последующих опытах Бон, Дэвис и Грей взрывали метано-водородо-кислородные смеси переменного состава $\text{CH}_4 - \text{O}_2 - x\text{H}_2$, где $x = 2, 4, 6, 8$. При этом оказалось, что процент несгоревшего метана пропорционален x^2 .

Так, для 1-й смеси $x = 2$; 2.9% CH_4 не сгорело;

„ 2-й смеси $x = 4$; 9.0% CH_4 „

„ 3-й смеси $x = 6$; 27.4% CH_4 „

Указанные авторы проводили также исследование по взрыванию смесей состава $\text{CH}_4 + \text{O}_2 + 2\text{CO}$ для установления порядка горючести метана и окиси углерода. При этом оказалось, что свободный углерод не выделялся и распределение кислорода между CH_4 и CO следующее:

от 4.3 до 5.1% O_2 идет к CO и

от 94.9 до 95.7% O_2 идет к CH_4 .

В заключение В. Бон пишет, что при ограниченном количестве кислорода возникает конкуренция между углеводородами и водородом, в результате которой углеводороды получают почти весь кислород, т. е. что в пламени углеводороды более горючи, чем водород.

Приступая к исследованию структуры пламени водяного газа, мы ясно отдавали себе отчет, что, применяя для исследования водяной газ, производимый в заводских условиях, мы не можем получить строго постоянных результатов исследования ввиду колебания в составе водяного газа; конечно, было бы более правильным искусственно приготавливать газовую смесь постоянного состава, тогда полученные результаты имели бы большую научную точность. Однако, в ущерб некоторой точности, мы сочли возможность работать с водяным газом, какой производится на заводе, чтобы полученные результаты имели большее приближение к действительным условиям.

Водяной газ производится в газовом цехе электролампового завода г. Томска в газогенераторах „Пинч“ с ручным обслуживанием. Топливом служит каменный уголь Араличевского месторождения. Уголь тощий, частично полуантрацитный, не спекается.

Состав угля в среднем: $W_p - 9.0\%$; $A^c - 16.0\%$; $S^0_{\text{общ}} - 0.8\%$; $C^c - 88.1\%$; $H^c - 4.0\%$; $N^c - 1.7\%$; $O^c - 5.3\%$; $V^c - 12.0\%$.

Технологический режим газификации не является строго постоянным и обычно изменяется в следующих пределах: период воздушного (горячего) дутья от 2 до 3 мин, период парового (холодного) дутья от 3 до 4 мин. иногда удлиняется до 5—6 мин. Основным признаком, пользуясь которым прекращают паровое дутье, является давление водяного газа перед выходом в скруббер; в начале парового дутья, давление в скруббере обычно 190 мм в. с., паровое дутье прекращается при понижении давления до 80 мм в. с. До ноября 1947 года применялся насыщенный водяной пар и, начиная с ноября 1947 г., перегретый пар давления 4 атм. и с температурой 325°C. Дутье только нижнее. В результате применения перегретого водяного пара теплотворная способность водяного газа значительно изменилась с 2500 ккал/м³ (в среднем) до 2760 ккал/м³ (в среднем) за счет увеличения содержания CH_4 .

С этой точки зрения можно было бы назвать производимый водяной газ двойным водяным газом, хотя никаких изменений конструктивного порядка в конструкцию генератора не введено.

Колебания в составе водяного газа по анализам его в январе, феврале и марте 1948 года приведены в таблице 3-й.

№№ п. п.	Наименование	Среднее %	Минимум %	Максимум %
1.	Химический состав в проц. объемных {			
	CO ₂	4.8	3.8	6.4
	O ₂	0.4	0.0	0.6
	CO	29.0	24.1	36.0
	H ₂	52.2	41.2	57.5
	CH ₄	6.2	2.5	8.6
	N ₂	7.3	1.3	10.2
2.	Теплотворная способность ккал/м ³ . . .	2760	2535	2930

Метод исследования

Исследование структуры пламени водяного газа производилось путем разделения двухконусного пламени; при этом химическим анализом определялся состав исходного газа, состав газозооушной смеси, подаваемой в горелку, и состав межконусных газов. Были выполнены следующие 5 серий опытов:

1-я серия (А)—пламя горелки Бунзена, изменялось количество воздуха в начальной смеси;

2-я серия (Б)—пламя горелки Меккера с платиновой сеткой на горелке, также изменялось количество воздуха в начальной смеси;

3-я серия (В)—пламя двухпроводной эжекционной горелки с принудительной подачей газа и воздуха в горелку;

4-я серия (Г)—пламя двухпроводной эжекционной горелки с платиновой сеткой;

5-я серия (Д)—опыты по сжиганию водяного газа в капиллярных трубках.

Схема установки для 1 и 2 серий опытов изображена на рис. 3.

В первой серии опытов выходное отверстие горелки (1) диаметром в свету 9 мм было открытым, во второй же серии опытов в выходное отверстие горелки вставлялся колпачек (2) с медными трубками диаметром 13 мм, покрытый сверху платиновой сеткой с числом отверстий 625 отверстий/см². На горелку посредством пробки вставлена внешняя стеклянная трубка (3) диаметром 35 мм, высотой 400 мм. Эта стеклянная трубка на расстоянии 2/3 высоты ее имела стеклянный отвод (4), диаметром 7 мм. Межконусные газы через этот стеклянный отвод и резиновую трубку (5) направлялись в аспиратор (6). Контрольные опыты проводились каждый раз при том же самом давлении, которое измерялось спиртовым U-образным манометром (7) на газопроводе; количество эжектируемого воздуха регулировалось открытием воздушных отверстий, для чего к муфте с воздушными отверстиями (8) был прикреплен стрелочный указатель (9), с помощью которого устанавливался угол поворота муфты. Зажигание горючей смеси сначала производилось с помощью нихромовой спирали (10), нагреваемой электрическим током до красного каления, но затем спираль была удалена во избежание каталитического влияния нихрома на процесс горения, и поджигание горючей смеси производилось сверху через широкую стеклянную трубку. В этом случае через горелку и трубку подавался только газ, доступ первичного воздуха закрыт. Затем с помощью муфты (8) немного открываются воздушные отверстия. Тогда у основания верхнего конуса над трубкой (3) намечается второй внутренний конус голубоватого цвета, очень неустойчивый. Высота этого конуса очень мала по сравнению с диаметром основания. По мере открывания

отверстия для первичного воздуха, первоначальная оранжево-желтоватая окраска внешнего конуса становится менее интенсивной, а внутренний конус опускается по стеклянной трубке до устья горелки и здесь стабилизируется. Образуется устойчивое раздельное двухконусное горение. Верхний конус в основном окрашен в фиолетовосиний цвет и по краям имеет голубоватую кайму, нижний конус—голубой со слегка зеленоватым оттенком.

При выполнении второй серии опытов на горелку надевался Меккерсовский колпачок со вставленной платиновой сеткой. Поджигание производилось так же, как описано выше. Следует заметить, что при наличии платиновой сетки горение во внутреннем конусе было устойчивым даже

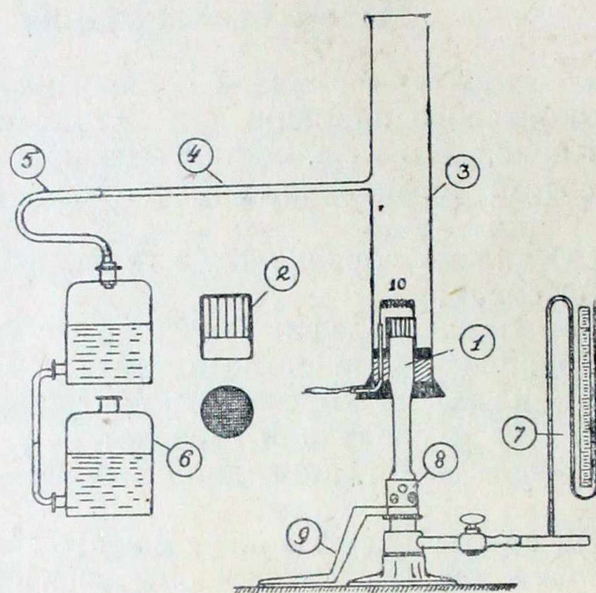


Схема установки для исследования раздельного двухконусного горения в инжекционной горелке.

Рис. 3

при добавлении значительного количества первичного воздуха, внутренний конус сливался с платиновой сеткой, так что его не было видно на глаз, платиновая сетка накаливалась до яркобелого каления. Так как первичный воздух эжектировался в количестве меньшем, чем требуется для полного горения, то над стеклянной трубкой попрежнему образовывался внешний конус горения.

Газовый анализ производился с помощью газоанализатора с дожиганием. Расчеты—по обычной методике.

Третья и четвертая серии опытов выполнялись на установке, изображенной на рис. 4.

Водяной газ из магистрали (1) под определенным давлением подается в газопровод (2), диаметром 15 мм, в газопроводе установлен вентиль (3) для регулирования расхода и острая диафрагма, диаметром 7.5 мм (4), перепад давления в диафрагме фиксируется дифференциальным манометром (5). Через сопло диаметром 1.5 мм (6) газ поступает в смеситель горелки (7). Ту же поступает воздух, нагнетаемый вентилятором по воздухопроводу (8) диаметром 25 мм. В воздухопроводе установлен вентиль

(9) для регулирования расхода и острая диафрагма (10) с дифференциальным манометром (11). Для получения раздельного двухконусного горения служит так же, как и в предыдущих опытах, стеклянная трубка (12) диаметром 40 мм, высотой 380 мм. Во избежание плавления и деформации стеклянной трубки, вследствие высокой температуры, внутренняя поверхность трубки тщательно изолирована асбестом (13) с двумя отверстиями

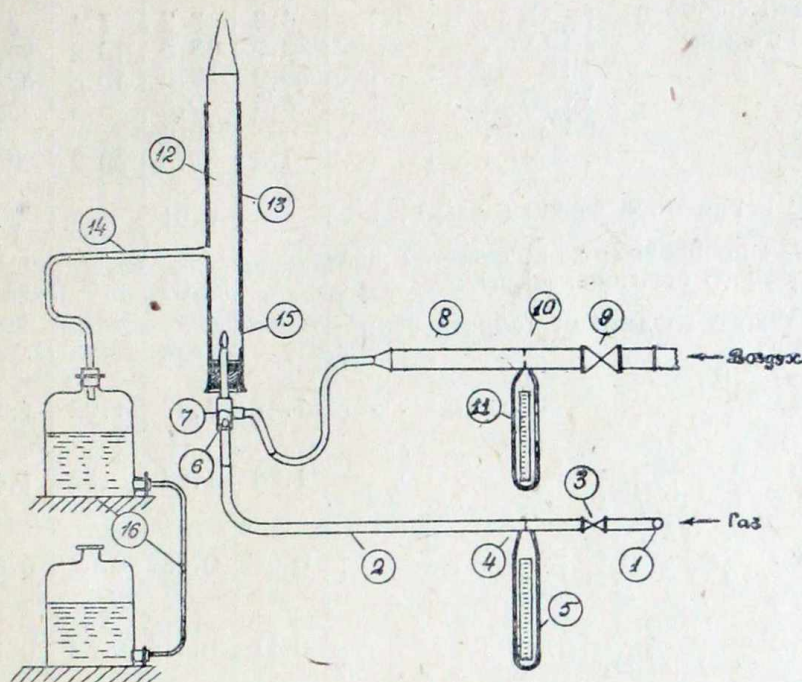


Рис. 4 Схема установки для исследования раздельного двухконусного горения в двухпроводной горелке.

Рис. 4

в асбесте: одно отверстие — против стеклянного отвода (14) и другое отверстие (15) — для визуального наблюдения за поведением внутреннего конуса. Межконусные газы, так же, как и первоначальная горючая смесь, забирались аспиратором (16) через стеклянную газоотводную трубку (14). Поджигание горючей смеси производилось так же, как и в предыдущих двух сериях опытов.

Результаты исследования

А. Опыты с инжекционной атмосферной горелкой

Опыты по сжиганию водяного газа в инжекционной атмосферной горелке выполнялись на установке, изображенной на рис. 3. Водяной газ из сети подавался в горелку под давлением в газопроводе 135 мм в. с. Давление газа регулировалось по спиртовому манометру вентилем на газопроводе, подсос первичного воздуха устанавливался открытием воздушных отверстий. В аспираторы забирались пробы водяного газа, горючей смеси и межконусных газов. Опыты производились при добавлении к водяному газу различных количеств первичного воздуха.

Результаты опытов представлены в табл. 4.

Результаты опытов серии А. Инжекционная атмосферная горелка. Давление газа 135 мм в. с.
Схема установки на рис. 3

№ № п. п.	Наименование	1—й опыт			2—й опыт			
		Водя- ной газ	Горю- чая смесь	Меж- конус. газы	Водя- ной газ	Горю- чая смесь	Меж- конус. газы	
.	Химический состав в проц. объемных	$\left\{ \begin{array}{l} \text{CO}_2 \dots\dots\dots \\ \text{CO} \dots\dots\dots \\ \text{H}_2 \dots\dots\dots \\ \text{CH}_4 \dots\dots\dots \\ \text{O}_2 \dots\dots\dots \\ \text{N}_2 \dots\dots\dots \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 4.2 \\ 36.0 \\ 53.0 \\ 5.5 \\ — \\ 1.3 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 2.2 \\ 18.8 \\ 27.8 \\ 2.8 \\ 10.0 \\ 39.3 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 7.4 \\ 19.2 \\ 19.8 \\ 3.4 \\ — \\ 50.2 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 4.0 \\ 30.5 \\ 53.4 \\ 5.2 \\ — \\ 6.9 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 1.8 \\ 14.0 \\ 24.5 \\ 2.4 \\ 11.4 \\ 45.9 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 7.6 \\ 16.6 \\ 19.4 \\ 1.8 \\ — \\ 54.6 \end{array} \right.$
2.	Количество первичного воздуха $\text{м}^3/\text{м}^3$. . .	—	0.91	—	—	1.18	—	
3.	Теоретически необходимое количество воз- духа для полного сжигания $\text{м}^3/\text{м}^3$	—	2.64	—	—	2.5	—	
4.	Доля первичного воздуха от теоретически необходимого	—	0.345	—	—	0.475	—	
5.	Отношение $\frac{\text{H}_2}{\text{CO}} =$	1.47	1.47	1.03	1.75	1.75	1.17	
6.	Отношение $\frac{\text{H}_2}{\text{CO} + \text{CH}_4} =$	1.28	1.28	0.88	1.49	1.49	1.05	
7.	Отношение $\frac{\text{CH}_4}{\text{CO} + \text{H}_2} =$	0.062	0.062	0.087	0.062	0.062	0.05	
8.	Отношение $\frac{\text{CO}_2}{\text{CO} + \text{CH}_4} =$	0.11	0.11	0.33	0.11	0.11	0.41	
9.	Теплотворная способность $\text{ккал}/\text{м}^3$	2930	—	1387	2756	—	1293	

Из данных, приведенных в табл. 4, следует, что при сжигании водяно-го газа с помощью инжекционной атмосферной горелки при недостатке первичного воздуха во внутреннем конусе пламени преимущественно выгорает водород; относительное уменьшение водорода по первому опыту

$$\frac{H_2}{CO + CH_4} = \frac{1.28}{0.88} = 1.45 \text{ и во втором опыте } \frac{1.49}{1.05} = 1.42. \text{ С уве-}$$

личением доли первичного воздуха с 0.345 до 0.475 относительная „горючесть“ водорода уменьшается, но увеличивается относительная „горючесть“ метана, хотя преимущественное выгорание остается за водородом. В этом убеждают также данные, приведенные в графе 8, — отношение

$$\frac{CO_2}{CO + CH_4}, \text{ которое увеличивается от } \frac{0.33}{0.11} = 3 \text{ до } \frac{0.41}{0.11} = 3.7.$$

Б. Опыты с платиновой сеткой в атмосферной инжекционной горелке

Опыты по сжиганию водяного газа на платиновой сетке в атмосферной инжекционной горелке выполнялись на установке, изображенной схематично на рис. 3. Водяной газ подавался в горелку из сети под давлением 150 мм в. с. Давление газа регулировалось по манометру с помощью вентиля, подсос первичного воздуха устанавливался открытием воздушных отверстий. Сжигание на платиновой сетке позволило увеличить под-

сос первичного воздуха без образования обратного движения пламени (без проскоков). Результаты опытов представлены в табл. 5.

Таблица 5

Результаты опытов серии Б. Инжекционная атмосферная горелка с платиновой сеткой.
Давление газа 150 мм в. с. (схема на рис. 3)

№№ п.п.	Наименование	1-й опыт			2-й опыт		
		Водя- ной газ	Горю- чая смесь	Меж- конус- ные газы	Водя- ной газ	Горю- чая смесь	Меж- конус- ные газы
1	Химический состав в проц. объемных						
	CO ₂	6.0	2.4	7.7	4.0	1.2	8.8
	CO	28.6	11.5	19.0	27.8	8.4	14.8
	H ₂	49.8	20.0	15.8	52.6	16.0	11.7
	CH ₄	7.0	2.8	2.7	7.9	2.4	3.2
	O ₂	0.4	12.7	—	—	14.6	—
2	N ₂	8.2	50.6	54.8	7.7	57.4	61.5
	Количество первичного воздуха м ³ /м ³	—	1.47	—	—	2.33	—
3	Теоретически необходимое количество воздуха для полного сжигания м ³ /м ³	2.54	—	—	2.66	—	—
4	Доля первичного воздуха от теоретически необходимого	—	0.58	—	—	0.88	—
5	Отношение $\frac{H_2}{CO} =$	1.74	1.74	0.834	1.89	1.89	0.79
6	Отношение $\frac{H_2}{CO+CH_4} =$	1.40	1.40	0.73	1.47	1.47	0.65
7	Отношение $\frac{CH_4}{CO+H_2} =$	0.089	0.089	0.078	0.098	0.098	0.12
8	Отношение $\frac{CO_2}{CO+CH_4} =$	0.168	0.168	0.356	0.112	0.112	0.49
9	Теплотворная способность ккал/м ³	2756	—	1220	2884	—	1026

Результаты, приведенные в табл. 5, показывают, что при сжигании водяного газа в присутствии платины относительное уменьшение водорода при горении составляет: в первом опыте $\left(\frac{H_2}{CO+CH_4}\right)_{\text{газ}} : \left(\frac{H_2}{CO+CH_4}\right)_{\text{м.к.г.}} =$
 $= \frac{1.4}{0.73} = 1.92$ и во втором опыте $\frac{1.47}{0.65} = 2.27$. Если сравнить эти

результаты с данными табл. 4 (серия А без каталитического влияния), то из сравнения следует, что под влиянием каталитического воздействия платины на процесс горения относительная „горючесть“ водорода возрастает по сравнению с окисью углерода и метаном. Кроме того, несмотря на увеличение доли первичного воздуха, относительная горючесть водорода не только не уменьшается, как это имеет место в серии опытов А, а, наоборот, возрастает. Если сравнивать результаты сжигания газа в присутствии платиновой сетки с результатами сжигания без сетки, но с увеличенным количеством первичного воздуха (табл. 6), то можно прийти к заключению, что, несмотря на увеличение доли первичного воздуха в горючей смеси при горении на сетке, преимущественное выгорание остается за водородом.

В. Опыты с двухпроводной горелкой

Опыты по сжиганию водяного газа с помощью двухпроводной горелки поставлены с той целью, чтобы иметь возможность знать не только соотношение между воздухом и газом в горючей смеси (по химическому

анализу), но и количества воздуха и газа путем их непосредственных измерений. Эти опыты выполнялись на установке, схематично изображенной на рис. 4. Расход воздуха и газа определялся по перепаду давления, создаваемому диафрагмами, поставленными в газо-воздухопроводах. Газопровод имеет внутренний диаметр 15 мм, диафрагма 7.5 мм. Расчетная формула для определения расхода газа

$$V_r = 0.54 \sqrt{h} \text{ м}^3/\text{час}$$

Воздухопровод имеет внутренний диаметр 25 мм, диафрагма 12.5 мм. Расчетная формула для определения расхода воздуха

$$V_a = 1.11 \sqrt{h} \text{ м}^3/\text{час}.$$

Выходное отверстие горелки имеет диаметр 9 мм. Скорость истечения горючей смеси из горелки была равной 10.6 м/сек. Результаты опытов представлены в табл. 6.

Т а б л и ц а 6

Результаты опытов серии В. Инжекционная двухпроводная горелка

Схема на рис. 4

Давление газа 100 мм в. с.

Давление воздуха 25 мм в. с.

Перепад давления в диафрагме 3.6 мм в. с.

Расход газа 1.027 м³/час.

Перепад давления воздуха в диафрагме 1.6 мм в. с.

Расход воздуха 1.4 м³/час.

Теоретически необходимое количество воздуха 2.37 м³/м³

№№ п.п.	Наименование	Водяной газ	Горючая смесь	Межконус- ные газы
1.	Доля первичного воздуха от теоретически необходимого	—	0.58	—
2.	Химический состав в проц. объемных	$\left\{ \begin{array}{l} \text{CO}_2 \dots\dots 4.6 \\ \text{CO} \dots\dots 29.5 \\ \text{H}_2 \dots\dots 51.5 \\ \text{CH}_4 \dots\dots 4.2 \\ \text{O}_2 \dots\dots — \\ \text{N}_2 \dots\dots 10.2 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 2.0 \\ 12.5 \\ 22.0 \\ 1.8 \\ 12.1 \\ 49.6 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 7.0 \\ 10.9 \\ 19.6 \\ 1.2 \\ 1.0 \\ 60.3 \end{array} \right.$
3.	Отношение $\frac{\text{H}_2}{\text{CO} + \text{CH}_4} =$	1.53	1.53	1.62
4.	Отношение $\frac{\text{H}_2}{\text{CO}} =$	1.74	1.74	1.8
5.	Отношение $\frac{\text{CH}_4}{\text{CO} + \text{H}_2} =$	0.052	0.052	0.033
6.	Отношение $\frac{\text{CO}_2}{\text{CO} + \text{CH}_4} =$	0.136	0.136	0.575
7.	Теплотворная способность ккал/м ³ . . .	2590	—	940

Из опытов серии В по сжиганию водяного газа с помощью двухпроводной горелки, дающей возможность измерять расход газа и воздуха, следует: 1) что относительная „горючесть“ водорода меньше, чем относительная „горючесть“ суммы окиси углерода и метана и 2) что относи-

тельная „горючесть“ метана больше, чем относительная „горючесть“ суммы окиси углерода и водорода. Сравнивая эти выводы с результатами исследования, приведенными в табл. 4, полученными в аналогичных условиях, можно было бы прийти к заключению о противоречивости их, однако следует обратить внимание на то, что в данном случае сжигание велось при большой доле первичного воздуха, доля первичного воздуха увеличена до 0.58 по сравнению с таковой в предыдущих опытах, где она составляла величину 0.345—0.475. Опыты серии А (табл. 4) и серии В (табл. 6) убеждают, что с увеличением доли первичного воздуха в горючей смеси относительная „горючесть“ водорода уменьшается и, кроме того, что при увеличении доли первичного воздуха до 0.5 и выше от теоретически необходимого преимущественное выгорание за водородом не сохраняется.

Г. Опыты с платиновой сеткой в двухпроводной горелке

Эти опыты выполнялись на установке, схематично изображенной на рис. 4. Выходное отверстие горелки было покрыто меккеровским колпачком с платиновой сеткой с числом отверстий 625 *отв/см*². Опыты с платиновой сеткой позволили увеличить расход газа и воздуха и выявить каталитическое влияние пламени на процесс горения индивидуальных газов. Выходное отверстие колпачка горелки имеет диаметр 12 мм. Живое сечение платиновой сетки при толщине проволоки 0.09 мм равнялось 0.000053 м².

Скорость истечения горючей смеси через сетку выражается величинами: 15.5 м/сек для первого опыта и 25.8 м/сек для второго опыта.

Таблица 7

Результаты опытов серии Г. Инжекционная двухпроводная горелка с платиновой сеткой

Схема на рис. 4

Давление газа 160 мм в. с.

Давление воздуха 60 мм в. с.

Перепад давления газа в диафрагме

1-й опыт 4.5 мм в. с.

2-й опыт 7.6 мм в. с.

Расход газа 1-й опыт 1.15 м³/час

2-й опыт 1.49 —

Перепад давления воздуха в диафрагме

1-й опыт 3.7 мм в. с.

2-й опыт 9.8 мм в. с.

Расход воздуха 1-й опыт 1.8 м³/час

2-й опыт 3.43 —

Теоретически необходимое количество воздуха

1-й опыт 2.55 м³/м³

2-й опыт 2.4 —

№ п.п.	Наименование	1-й опыт			2-й опыт			
		Водяной газ	Горючая смесь	Межконусные газы	Водяной газ	Горючая смесь	Межконусные газы	
1.	Доля первичного воздуха от теоретически необходимого	—	0.62	—	—	0.95	—	
2.	Химический состав в проц. объемных.	CO ₂	4.2	1.7	10.2	5.4	1.6	14.0
		CO	29.4	11.4	10.2	25.1	7.7	1.5
		H ₂	52.3	20.2	7.5	55.3	16.3	1.0
		CH ₄	6.4	2.5	2.4	5.7	1.7	0.3
		O ₂	—	12.8	—	—	14.8	—
		N ₂	7.7	51.4	69.7	9.5	57.9	83.2
3.	Отношение $\frac{H_2}{CO} =$	1.78	1.78	0.735	2.2	2.2	0.66	

4.	Отношение $\frac{H_2}{CO+CH_4} =$	1.46	1.46	0.59	1.80	1.80	0.55
5.	Отношение $\frac{CH_4}{CO+H_2} =$	0.078	0.078	0.135	0.071	0.071	0.12
6.	Отношение $\frac{CO_2}{CO+CH_4} =$	0.117	0.114	0.81	0.175	0.170	7.8
7.	Теплотворная способность ккал/м ³	2800	—	712	2685	—	97.8

Из опытов серии Г по сжиганию водяного газа на платиновой сетке двухпроводной горелки вытекает, что преимущественно выгорает водород, так как относительное количество водорода уменьшается; в первом опыте отношение

$\left(\frac{H_2}{CO+CH_4}\right)^{газ} : \left(\frac{H_2}{CO+CH_4}\right)^{м.к.г.} = \frac{1.46}{0.59} = 2.47$ и во втором опыте это отношение равно $\frac{1.8}{0.55} = 3.3$. Если сравнить эти опыты с опытами

серии В, проводимыми также на платиновой сетке, но с меньшим количеством первичного воздуха (табл. 5), то из сравнения вновь следует, что при каталитическом воздействии платины одновременно с увеличением доли первичного воздуха увеличивается „горючесть“ водорода. Сильно запаздывает выгорание метана.

Следующий опыт был поставлен также при помощи двухпроводной горелки, покрытой платиновой сеткой, но при значительно увеличенном расходе воздуха и газа. Расход газа был 2.5 м³/час и расход воздуха 9.5 м³/час.

Для водяного газа состава, указанного в табл. 8, теоретически необходимое количество воздуха составляет 2.5 м³/м³, следовательно, горение происходило с избытком воздуха, равным $\frac{9.5}{2.5 \cdot 2.5} = 1.52$. Следовало

бы ожидать, что в продуктах горения не должно быть несгоревших газов и, тем более, несгоревшего водорода, однако в действительности в продуктах горения оказались несгоревшими как СО, СН₄, так и водород, что видно из табл. 8.

Результаты исследования сжигания водяного газа с избытком первичного воздуха в двухпроводной горелке показывают: 1) что, несмотря на значительный избыток воздуха, не достигается полного выгорания компонентов газа вследствие несовершенства смешения газа и воздуха, 2) что при избытке воздуха выгорание водорода происходит быстрее выгорания метана.

Следует отметить, что в этом опыте фронт пламени не имел никакой определенной формы, несгоревшие газы вместе с избытком кислорода „прорывались“ через фронт пламени вследствие большой скорости истечения. Повидимому, вследствие большой скорости прохождения газа через фронт пламени и несовершенства смешения, несмотря на большой избыток воздуха, горение оказалось неполным. Скорость истечения горючей смеси через сетку составила 42.5 м/сек.

Результаты сжигания водяного газа с избытком первичного воздуха в горелке по схеме на рис. 4

Давление газа 200 мм в. с.

Давление воздуха 80 мм в. с.

Перепад давления газа в диафрагме 10 мм в. с.

Расход газа 1.7 м³/час.

Перепад давления воздуха в диафрагме 34 мм в. с.

Расход воздуха 6.45 м³/час.

Теоретически необходимое количество воздуха 2.5 м³/м³.

Коэффициент избытка воздуха 1.52.

№№ п.п.	Наименование	Водяной газ	Продукты горения
1.	Химический состав в проц. объемных	CO ₂ . . .	5.3
		CO . . .	25.6
		H ₂ . . .	57.5
		CH ₄ . . .	5.7
		O ₂ . . .	0.3
		N ₂ . . .	5.6
2.	Отношение $\frac{H_2}{CO} =$	2.24	3.86
3.	Отношение $\frac{CH_4}{CO+H_2} =$	0.069	0.725
4.	Отношение $\frac{CO_2}{CO+CH_4} =$	0.169	4.15
5.	Теплотворная способность ккал/м ³ .	2760	—
6.	Неполнота тепловыделения ккал/м ³ .	—	257.3

Д. Опыты по сжиганию водяного газа в капиллярных трубках

Все предыдущие опыты были выполнены в условиях раздельного двухконусного горения при истечении горючей смеси с образованием неподвижного фронта пламени, при этом анализировался состав межконусных газов, но не количество их. Для того, чтобы можно было составить ясное представление о распределении кислорода воздуха для горения CO, H₂, CH₄ в отдельности, необходимо было поставить опыты, которые позволили бы измерять количество образовавшихся продуктов неполного горения и соотношение между ними. Такое исследование было выполнено путем сжигания смеси водяного газа и воздуха в определенном соотношении:

при сжигании в фарфоровой трубке отношение $\frac{\text{газ}}{\text{воздух}} = 0.852 : 1$,

при сжигании в платиновой трубке отношение $\frac{\text{газ}}{\text{воздух}} = \frac{1}{1}$, в обо-

их случаях первоначальное количество горючей смеси было 100 см³. Горючая смесь неоднократно пропускалась через трубки, нагреваемые снаружи пламенем газовой горелки до тех пор, пока объем полученных продуктов горения становился постоянным; это указывало на прекращение процесса горения вследствие полного исчезновения кислорода воздуха. Затем состав полученных продуктов неполного горения анализировался обычным методом. Схема установки изображена на рис. 5. Результаты исследования представлены в табл. 9.

Таблица 9

Результаты опытов серии Д. Сжигание водяного газа в капиллярных трубках
Схема на рис. 5

№№ п.п.	Наименование	Фарфоровый капилляр			Платиновый капилляр		
		Водя- ной газ	Горю- чая смесь	Продук- ты непол- ного го- рения	Водя- ной газ	Горю- чая смесь	Продук- ты непол- ного го- рения
1	Химический состав в проц. объемных	$\left\{ \begin{array}{l} \text{CO}_2 \dots\dots\dots 6.4 \\ \text{O}_2 \dots\dots\dots 0.4 \\ \text{CO} \dots\dots\dots 35.1 \\ \text{H}_2 \dots\dots\dots 48.4 \\ \text{CH}_4 \dots\dots\dots 2.5 \\ \text{N}_2 \dots\dots\dots 7.2 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 2.9 \\ 11.5 \\ 16.2 \\ 22.3 \\ 1.1 \\ 46.0 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 7.2 \\ - \\ 14.1 \\ 19.6 \\ 0.7 \\ 58.5 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 5.0 \\ 0.2 \\ 25.9 \\ 54.5 \\ 6.9 \\ 7.5 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 2.5 \\ 10.6 \\ 12.9 \\ 27.3 \\ 3.4 \\ 43.3 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 8.18 \\ - \\ 17.35 \\ 19.30 \\ 2.47 \\ 52.70 \end{array} \right.$
2	Отношение газ/воздух	—	0.852:1	—	—	1:1	—
3	Теоретически необходимое количество воздуха для полного сжигания $\text{м}^3/\text{м}^3$	2.2	—	—	2.56	—	—
4	Доля первичного воздуха от теоретически необходимого	—	0.534	—	—	0.39	—
5	Число объемов	$\left\{ \begin{array}{l} \text{CO}_2 \dots\dots\dots 6.4 \\ \text{O}_2 \dots\dots\dots 0.4 \\ \text{CO} \dots\dots\dots 35.1 \\ \text{H}_2 \dots\dots\dots 48.4 \\ \text{CH}_4 \dots\dots\dots 2.5 \\ \text{H}_2\text{O} \dots\dots\dots - \\ \text{N}_2 \dots\dots\dots 7.2 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 6.4 \\ 25.0 \\ 35.1 \\ 48.4 \\ 2.5 \\ - \\ 99.6 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 12.4 \\ - \\ 24.2 \\ 33.7 \\ 1.2 \\ 39.6 \\ 99.6 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 5.0 \\ 0.2 \\ 25.9 \\ 54.5 \\ 6.9 \\ - \\ 7.5 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 5.0 \\ 21.2 \\ 25.9 \\ 54.5 \\ 6.9 \\ - \\ 86.5 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 12.4 \\ - \\ 21.0 \\ 27.3 \\ 4.3 \\ 32.4 \\ 86.5 \end{array} \right.$
	Всего	100	217	210.7	100	200	183.9
6	Отношение $\frac{\text{H}_2}{\text{CO}} =$	1.38	1.38	1.4	2.1	2.1	1.1
7	Отношение $\frac{\text{H}_2}{\text{CO} + \text{CH}_4} =$	1.20	1.20	1.34	1.66	1.66	0.98
8	Отношение $\frac{\text{CH}_4}{\text{CO} + \text{H}_2} =$	0.029	0.029	0.002	0.0865	0.0865	0.0675
9	Отношение $\frac{\text{CO}_2}{\text{CO} + \text{CH}_4} =$	0.159	0.159	0.48	0.152	0.152	0.41
10	Теплотворная способность $\text{ккал}/\text{м}^3$	2535	—	996	2790	—	1242
11	Сгорело объемов	$\frac{\text{CO}}{10.9}$	$\frac{\text{H}_2}{14.7}$	$\frac{\text{CH}_4}{1.3}$	$\frac{\text{CO}}{4.9}$	$\frac{\text{H}_2}{27.2}$	$\frac{\text{CH}_4}{2.6}$
12	Распределение кислорода % при горении	35.5	47.7	16.8	11.5	64.0	24.5

Результаты опытов серии Д по сжиганию водяного газа в капиллярной фарфоровой трубке, т. е. при слабом каталитическом действии стенок на процесс горения, позволяют сделать выводы о том, что так же, как

и в опытах серии В, где сжигание велось с первичным воздухом, доля которого больше 0.5 (табл. 6) преимущественное выгорание остается за суммой окиси углерода и метана, „горючесть“ же водорода меньше „горючести“ остальных газов; при этом следует предположить, что преимущест-

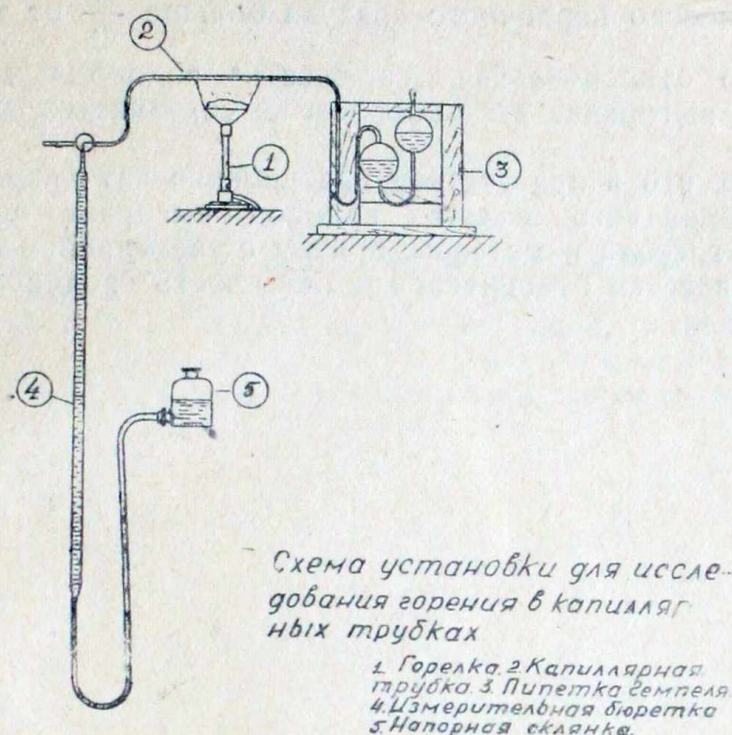


Рис. 5

венно выгорает метан, если сравнить распределение кислорода между водородом, окисью углерода и метаном при горении.

При сжигании водяного газа в капиллярной платиновой трубке относительное уменьшение водорода при горении равно отношению

$$\left(\frac{H_2}{CO + CH_4} \right)_{газ} : \left(\frac{H_2}{CO + CH_4} \right)_{т.к.г.} = \frac{1.66}{0.98} = 1.7 \text{ при количестве воздуха равном } 0.39 \text{ от теоретически необходимого.}$$

Сравнение этих результатов с данными, полученными в фарфоровом капилляре, выявляет большую „горючесть“ водорода по сравнению с окисью углерода и метаном вследствие каталитического влияния платины. Кроме того, если сопоставить эти данные с результатами исследования горения тоже в присутствии платины, но с большим количеством воздуха (табл. 5, 7), то можно сделать вывод, что при уменьшении количества первичного воздуха „горючесть“ водорода уменьшается.

Выводы

1. В статье изложено описание экспериментальной работы по исследованию структуры пламени водяного газа методом двухконусного раздельного горения, когда образуются две неподвижные конические поверхности горения, а также в капиллярных трубках.

2. Показано, что при отсутствии активного катализатора индивидуальные газы, составляющие водяной газ, выгорают в такой последовательно-

сти: при наличии в горючей смеси первичного воздуха в количестве, не превышающем $\frac{1}{2}$ от теоретически необходимого для полного сжигания, водород выгорает преимущественно по сравнению с окисью углерода и метаном; если количество первичного воздуха больше $\frac{1}{2}$ от теоретически необходимого, то относительная „горючесть“ водорода уменьшается, преимущественное выгорание за водородом не сохраняется, уступая свое место метану.

3. Показано, что в присутствии платинового катализатора при любых количествах первичного воздуха водород выгорает преимущественно перед окисью углерода и метаном, причем с увеличением доли первичного воздуха увеличивается относительная „горючесть“ водорода.