

ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ НА НОРМАЛЬНУЮ СКОРОСТЬ ПЛАМЕНИ
МЕТАНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ

В. С. Бабкин, Л. С. Козаченко, И. Л. Кузнецов

(Новосибирск)

Влияние давления и температуры на нормальную скорость пламени в метано-воздушной смеси изучено при помощи бомбы постоянного объема в диапазоне давлений 1—60 *ата* и температур 16—220° С. Видимая скорость определялась на начальном участке путем скоростной киносъемки с использованием оптической шпирен-системы. Нормальная скорость вычислялась как результат деления видимой скорости на расчетный коэффициент расширения. В диапазоне давлений 3—60 *ата* нормальная скорость подчиняется зависимости $S_u \sim p^{-0.5}$.

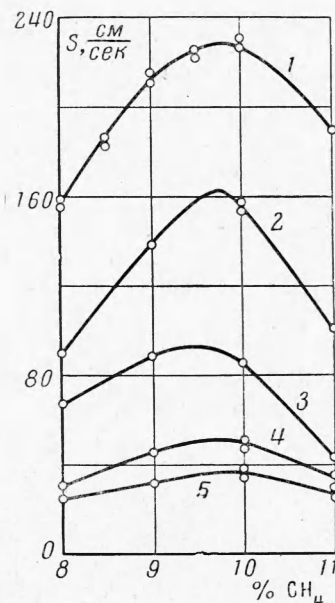
1. Изучение влияния высокого давления на нормальную скорость пламени началось сравнительно недавно на базе методов, разработанных для измерений нормальных скоростей при низких давлениях (0.1—3 *ата*). Метод бомбы постоянного объема был использован Ямпольским и Прайсом [1] для исследования взрывов водородно-воздушных смесей до 900 *ата*. Смит и Агню [2] этот метод использовали для определения скорости пламени при начальных давлениях до 20 *ата* в смесях метан-кислород-азот. Видоизмененный метод бомбы постоянного давления был успешно применен Штраусом и Эдсом [3] для ряда топливно-воздушных и топливно-кислородных смесей, горящих под давлением до 90 *ата*. В широком диапазоне давлений вплоть до 40 *ата* метод бунзеновской горелки был применен Дидерихсеном и Вольфгардом для метано-воздушных смесей [4]. Влияние давления на скорость пламени смесей метана, пропана, этилена и пропилена с воздухом в диапазоне 0.5—9 *ата* изучалось методом трубки Эджертоном и Лефебром [5].

При переходе на повышенные давления применение вышеперечисленных методов встретило определенные трудности. Как указывают Дидерихсен и Вольфгард, применение бунзеновской горелки с барокамерой при высоких давлениях требует уменьшения диаметров горелки до очень малых размеров (в их опытах при 20 *ата* диаметр горелки составлял 1.7 мм), что в значительной степени затрудняет наблюдение пламен. С другой стороны, это приводит к необходимости измерения весьма малых расходов газа, что связано с увеличением ошибки. В опытах Дидерихсена и Вольфгарда при стехиометрическом соотношении в смеси и 20 *ата* расход метана был около 0.1 мл / сек. В работе [4] указывается также на трудность стабилизации пламени на бунзеновских горелках.

Метод бомбы постоянного объема с применением записи давление — время хотя и является старым методом, однако не позволяет получить надежные значения нормальных скоростей пламени, так как различными авторами предлагаются противоречивые уравнения для их определения [6,7].

Штраус и Эдс [3], работая при высоких давлениях с мыльным пузырем, отметили трудность регистрации границ пузыря, поэтому вместо обычно экспериментально определяемого коэффициента расширения продуктов сгорания они использовали его термодинамическое расчетное значение.

Весьма удачной попыткой определения нормальной скорости пламени является метод с применением ионизационных датчиков, использованный Смитом и Агню [2],

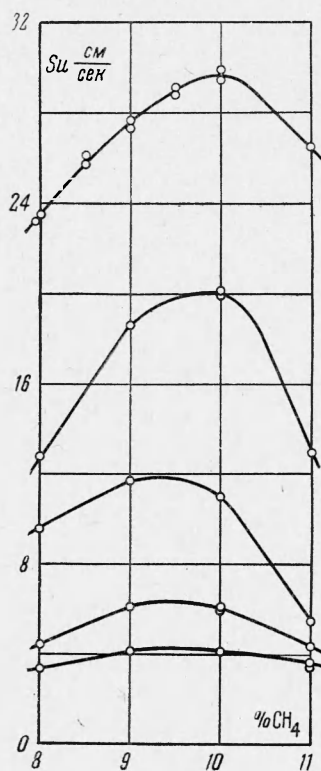


Фиг. 1

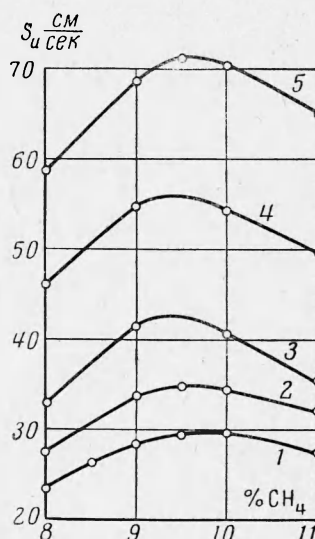
в сочетании с измерениями видимой скорости пламени посредством этих датчиков на ранних стадиях горения, когда процесс распространения пламени в замкнутой бомбе можно считать процессом¹ при постоянном давлении [8].

В настоящей работе предпринято дальнейшее изучение влияния давления на нормальную скорость пламени метано-воздушных смесей при начальных давлениях до 60 *ата* и ее температурной зависимости до 220° С при атмосферном давлении. Измерения нормальной скорости проводились в закрытой сферической бомбе с центральным зажиганием на начальном участке распространения пламени с применением покадровой съемки шпирен-методом.

2. Описание экспериментов. Закрытая сферическая бомба представляла собой толстостенный стальной сосуд с рабочей полостью 183 мм, снабженный смотровыми окнами на противоположных сторонах бомбы из оптического стекла диаметром 72 мм и толщиной 48 мм. Бомба была оборудована стальными регулируемые электродами для поджигания смеси централизованной искрой и вентилями высокого давления для наполнения бомбы горючей смесью и от-



Фиг. 2



Фиг. 3

качки. Регистрация пламени производилась посредством скоростной киносъемки с использованием оптической шпирен-системы и серийного искрового разряда в качестве источника света. Применялся типичный вариант шпирен-системы с двумя длиннофокусными объективами типа Телемар-2, причем бомба располагалась в параллельном пучке света между этими объективами.

Распространение пламени изучалось на начальном участке его движения, когда радиус сферического пламени не превышает $1/4$ радиуса бомбы. При этом рост давления в бомбе не более 1.5%, и, таким образом, можно считать, что распространение пламени происходит при постоянном давлении, равном начальному. Анализ показывает, что принципиальная ошибка в определении нормальной скорости пламени, вызванная этим приближением, также не превышает 1.5% и, вообще говоря, может быть учтена. Участок формирования пламени непосредственно после искрового воспламенения исключался из рассмотрения, так как энергия искры и кривизна фронта пламени оказывают на этом участке сильное влияние на видимую скорость. Последнее обстоятельство позволило легко определить протяженность этого участка непосредственно по фоторегистрациям пламени.

¹ В 1950 г. Д. Г. Никитин исследовал методом бомбы постоянного объема с применением ионизационных датчиков для регистрации пламени зависимость нормальной скорости распространения пламени от давления для воздушных смесей некоторых углеводородов при изменении начального давления от 1 до 8 *ата* (Канд. дисс. Институт химической физики АН СССР, М., 1950).

Более поздние стадии процесса распространения пламени связаны со значительным повышением давления в бомбе, которое при достаточно высоком начальном давлении может привести к разрушению установки. Для предотвращения этого при расширении диапазона начальных давлений бомба была снабжена предохранительной мембраной из красномедной фольги, которая выдерживала начальное давление, а затем, разрываясь, обеспечивала сброс повышенного давления после того, как процесс распространения пламени на начальном участке уже зафиксирован. При сравнительно низких начальных давлениях порядка 10 атм , когда не было опасности разрушения бомбы, предохранительная мембрана заменялась стальной диафрагмой, не разрушавшейся после взрыва.

Изменение начальной температуры смеси достигалось нагреванием бомбы при помощи электрических подогревателей. Равномерность подогрева обеспечивается большой массой бомбы.

3. Результаты экспериментов. В результате обработки кинорегистраций определялась величина видимой скорости пламени S , а нормальная скорость S_u находилась из соотношения $S_u = S / E$, где E — коэффициент расширения продуктов при горении в условиях постоянного давления. Последний вычислялся из термодинамических соотношений с учетом диссоциации. Видимая скорость определялась по наклону прямой линии, касательной к развивающимся во времени сферам пламени. Хотя, как указывалось, состояние свежей смеси перед фронтом пламени и состояние продуктов горения несколько изменялось по мере развития процесса, тем не менее видимая скорость пламени оставалась на рассматриваемом участке постоянной с точностью до ошибки измерения. Как отмечалось, энергия воспламеняющей искры оказывает некоторое влияние на формирование пламени, поэтому для воспламенения смеси использовалась искра с минимальной энергией. Такая искра подбиралась экспериментальным путем. Специальные измерения энергии искры не проводились.

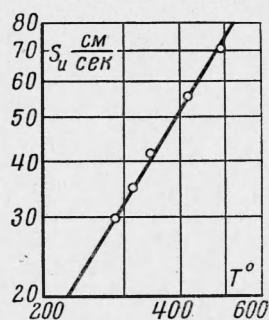
Необходимо отметить, что в некоторых опытах формировались несферические пламена и, хотя при данной методике, строгая сферичность пламени не является обязательной, тем не менее такие кинорегистрации к обработке не принимались¹.

Во всех опытах исследовалось распространение пламени в смесях метана с воздухом. Хроматографический анализ метана показал следующий его состав: 98,2% CH_4 , 1,33% N_2 , 0,32% CO_2 , 0,033% O_2 , неизвестные компоненты — 0,117%. Для данного метана стехиометрической смеси с воздухом соответствует 9,65% метана и 90,35% воздуха.

На фиг. 1 приведены зависимости видимой скорости $S \text{ см / сек}$ распространения пламени от объемного содержания (в %) метана в смеси; кривые 1, ..., 5 соответствуют значениям начального давления $p_0 = 1,0, 3,5, 10, 36, 60 \text{ атм}$. Начальная температура смеси при этих измерениях равнялась 16°C . На основании этих опытных данных и соотношения $S_u = S / E$ построены зависимости нормальной скорости пламени от объемного содержания метана в смеси при различных давлениях (фиг. 2) и зависимость нормальной скорости пламени от давления для смеси стехиометрического состава (сплошная линия на фиг. 5). Зависимость нормальной скорости $S_u \text{ см / сек}$ пламени от содержания метана при различных начальных температурах T_0 представлена на фиг. 3, где кривые 1, 2, 3, 4, 5 соответствуют значениям $T_0 = 16, 40, 70, 140, 220^\circ \text{C}$. Эти опыты проводились при атмосферном давлении. На фиг. 4 в логарифмических координатах дана зависимость нормальной скорости пламени от температуры для стехиометрической смеси.

4. Обсуждение результатов. Влияние давления на нормальную скорость пламени в метано-воздушных смесях при низких давлениях подверглось, вероятно, наиболее многочисленному изучению по сравнению с другими горючими смесями. Однако противоречивость опубликованных данных свидетельствует о трудности точного определения этого влияния. Что касается высоких давлений, то сведения относительно зависимости нормальной скорости от давления весьма ограничены. На фиг. 5 приведена в логарифмической шкале сводка данных о зависимости нормальной скорости пламени от начального давления для стехиометрической метано-воздушной смеси из некоторых опубликованных работ, а также результаты настоящей работы (точки 7).

¹ При повышенных давлениях в метано-воздушных смесях наблюдается тенденция к образованию неизотропных сферических пламен. Такие пламена принимались в рассмотрение.

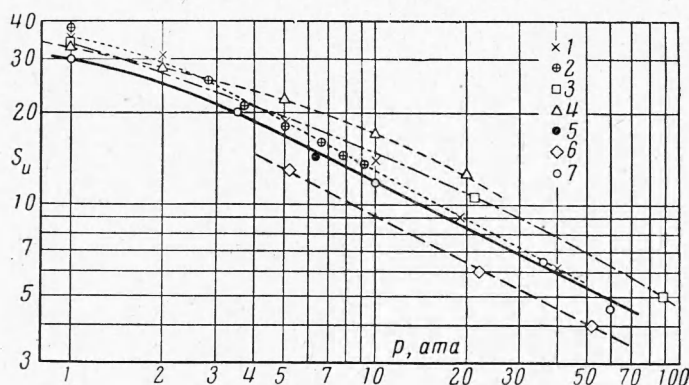


Фиг. 4

Такое представление экспериментальных результатов позволяет анализировать зависимость от давления в форме

$$S_u = \text{const } p^{-n}$$

Из фиг. 5 видно, что нормальные скорости пламени, полученные в настоящей работе в диапазоне от 3 до 60 *ата*, хорошо ложатся на прямую линию, отвечающую $n = 0.5$. В этом диапазоне скорость пламени можно выразить зависимостью $S_u = 37.4 / \sqrt{P}$. Ниже 3 *ата* наблюдается тенденция к понижению n . Аналогичный ход зависимости отмечен в работе Дидерихсена и Вольфгарда [4], кривая точки 1. В этой работе имеется перелом прямой при 2 *ата*, причем прямой от 3 до 40 *ата* соответствует $n \approx 0.53$, а от 0.1 до 1 *ата* $n \approx 0.2$. В хорошем соответствии с результатами авторов как по величине показателя, так и абсолютным значениям S_u находятся результаты Лефевра и Эджертона [5] точки 2, в диапазоне начального давления от 3 до 9 *ата*. Упомянутую тенденцию зависимости нормальной скорости при низком и высоком дав-



Фиг. 5

лениях можно проследить в работе [3] точки 3, и в работе [8] точки 4. Если зависимость от давления в этих работах рассматривать в вышеупомянутой форме, то можно видеть, что n постоянно возрастает у Агню и Гриффа [8] в диапазоне от 0.2 до 20 *ата*, у Штрауса и Эдса [3] от 1 до 90 *ата*. На фиг. 5, точка 5 в работе [9] находится в хорошем согласовании с данными настоящей работы, а точка 6 (данные Штрауса и Эдса, полученные методом горелки [8]) согласуются по показателю степени n .

Что касается давлений ниже атмосферного, то анализ экспериментальных результатов в работах [4, 8-10] показывает, что для смесей, близких по составу к стехиометрическим, показатель n лежит в пределах от 0.1 до 0.2. В бедных метано-воздушных смесях получено значение $n = 0.49$ [11]. Таким образом, представляется, что зависимостью вида $S_u = \text{const} \cdot p^{-n}$ нельзя удовлетворительно описать влияние давления в широком диапазоне, скажем от 0.1 до 100 *ата*.

Весьма противоречивыми являются максимальные значения нормальных скоростей пламени при атмосферном давлении. Здесь скорости колеблются от 28 до 40 *см/сек*. При этом экспериментальные значения концентрируются в двух областях: от 32 до 34 *см/сек* [3, 8, 9, 12] и от 37 до 40 *см/сек* [2, 4, 10, 13, 14]. В отношении работ [2, 10] можно заметить, что здесь нормальные скорости могут быть завышены из-за занижения местного коэффициента расширения [7], в частности для стехиометрической смеси на величину порядка 8%.

В настоящей работе при атмосферном давлении максимальная нормальная скорость пламени равна 30 *см/сек*. Это частично оправдывается низкой начальной температурой смеси (16° С). Расхождение в нормальных скоростях, возможно, проистекает также из расхождений в расчетных коэффициентах расширения, поэтому в данной работе наряду с нормальными скоростями приводятся также и видимые скорости пламени (фиг. 1). Так, для смеси стехиометрического состава метана с воздухом по [8] значение видимой скорости около 235 *см/сек*, что очень близко к настоящей работе — 231 *см/сек*. Что касается ошибки в нормальных скоростях вследствие возможного неравновесного состояния продуктов сгорания, то этот вопрос до сих пор остается дискуссионным.

Поступила 15 VII 1963

ЛИТЕРАТУРА

1. Ямпольский Ж. и Прайс С. Взрывы водородо-воздушных смесей в закрытом сосуде при высоком давлении. IV Симпозиум (международный) по вопросам горения и детонационных волн, Оборонгиз, М., 1958.
2. Smith D. and Angew J. T. The effect of pressure on the laminar burning velocity of methane-oxygen-nitrogen mixtures. VI Symposium (International) on Combustion, New York, London, 1957.
3. Strauss W. A. and Edse R. Burning velocity measurements by the constant — pressure bomb method. VII Symposium (International) on Combustion, London, 1959.
4. Diederichsen J. and Wolfhard H. G. The burning velocity of methane flames at high pressure. Trans. Faraday Soc., 1956, vol. 52, Part 8.
5. Egerton A. C. and Lefevre A. H. Flame propagation: the effect of pressure variation on burning velocities. Proc. Roy. Soc., 1954, A, vol. 222, No. 1149.
6. Rallis C. J. and Tremmer G. E. B. Equations for the determination of burning velocity in a spherical constant volume vessel. Combustion and Flame, 1963, vol. 7, No. 1.
7. Бабкин В. С., Козаченко Л. С. и Кузнецов И. Л. Об измерении скорости распространения пламени методом бомбы постоянного объема. ПМТФ, 1963, № 6.
8. Agnew J. T. and Graiff L. B. The pressure dependence of laminar burning velocity by the spherical bomb method. Combustion and Flame, 1961, Vol. 5, No. 3.
9. Wohl K. and Kapp N. M. Flame stability at variable pressures. Project Meteor Rep., No UAC-42, United Aircraft Corp., 1949.
10. Manton J., Milliken B. B. Study of pressure dependence of burning velocity by the spherical vessel method. Proceedings of the gas dynamics symposium on aerothermochemistry, Northwestern University, Evanston, Illinois, 1956.
11. Эджертон А. и Сен Д. Распространение пламени. Влияния давления на скорость распространения плоского фронта пламени. IV Симпозиум (международный) по вопросам горения и детонационных волн. Оборонгиз, М., 1958.
12. Lewis B. and von Elbe G. Combustion, Flames and Explosions of Gases. Academic Press, INC, New York and London, 1961.
13. Scholte T. G. and Vags P. B. The burning velocity of hydrogen-air mixtures and mixtures of some hydrocarbons with air. Combustion and Flame, 1959, vol. 3, No. 4.
14. Singer J. M., Grumer J., Cook E. B. Burning velocities by the Bunsen-burner method. Proceedings of the gas dynamics symposium on aerothermochemistry, Northwestern University, Evanston, Illinois, 1956.

**О ЗАВИСИМОСТИ СКОРОСТИ ГОРЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ГОРЮЧИХ СИСТЕМ
ОТ НАЧАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ**

А. Д. Марголин, О. И. Нефедова, П. Ф. Похил

(Москва)

Проведено экспериментальное изучение зависимости скорости горения представителей (гексоген, смесь перхлората калия с вольфрамом, цирконием и бензоатом калия) различных групп горючих систем от начальной температуры (от -140° до $+150^{\circ}$). При опытах варьировались соотношения компонентов смеси, плотность заряда и давление инертного газа, в котором производилось сжигание.

Опыты показали, что логарифм скорости горения u ($\lg u$) гексогена и смесей перхлората калия с металлами линейно связан с начальной температурой вещества T_0 . Зависимость $\lg u = f(T_0)$ смеси перхлората калия с бензоатом калия имеет излом.

Результаты опытов сопоставлены с гипотезой о переходе ведущей стадии, определяющей скорость горения, с ростом температуры от одной пространственной стадии горения к другой.

Изучение зависимости скорости горения взрывчатых веществ от начальной температуры имеет большое значение для теории горения [1, 2].

Ранее [3, 4] было показано, что зависимость скорости горения u пороха H от начальной температуры T_0 имеет аномальный характер (излом на кривой в координатах