

11. S. Klein, L. Sahni. С.г. Academie des Sciences, 1968, 267, 12.
12. В. Е. Анисимов. Канд. дисс. Воронежский университет, Воронеж, 1964.
13. А. П. Боронин, Т. Г. Игнатьева. В сб. «Физическая газодинамика и свойства газов при высоких температурах», М., «Наука», 1964.
14. Б. С. Фиалков, В. К. Грузинов. Изв. вузов. Черная металлургия, 1961, 10.
15. Б. С. Фиалков, В. К. Грузинов, Б. И. Микрюков. Сталь, 1963, 7.

УДК 536.46+662.614

ВЛИЯНИЕ ПАРОВ ВОДЫ НА НОРМАЛЬНУЮ СКОРОСТЬ ПЛАМЕНИ МЕТАНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ

В. С. Бабкин, А. В. Вьюн
(Новосибирск)

Участие воды в процессах горения обусловлено, с одной стороны, тем, что на практике энергетическое топливо часто является влажным или высокообводненным. С другой стороны, введение пара или воды в реакционный объем позволяет в ряде случаев лучше организовать процесс и направить его в нужном направлении, например понизить температуру газа перед турбиной, обеспечить защиту камер сгорания от воздействия высоких температур.

Вместе с тем следует отметить, что принципиальная сторона вопроса — роль воды в тех или иных процессах горения — изучена крайне недостаточно. Наряду с распространенными представлениями о воде как о чисто инертном компоненте или поглотителе тепла существуют мнения, согласно которым вода принимает активное промотирующее участие при химических превращениях. При горении угля вода, как полагают, активно содействует процессу окисления, увеличивает суммарную скорость выгорания [1]. Добавка воды увеличивает в определенных условиях скорость окисления этана [2] и горения водорода [3]. Наконец, скорость горения окиси углерода, как известно, в значительной степени определяется величиной добавки воды.

Вряд ли можно ожидать однозначного ответа для процессов, протекающих при разных условиях. Добавка воды, вследствие ее большой теплоемкости, приводит к сильному понижению температуры. С другой стороны, при ее диссоциации образуются активные атомы О и Н и радикал ОН, способные сильно ускорять реакцию. Высокая излучательная способность воды также в некоторых условиях может дать существенный эффект.

В связи с этим представляет интерес исследовать влияние добавок на элементарное явление горения — ламинарное пламя метана в важной для современной техники области — при высоких давлениях и широком диапазоне добавок воды.

Результаты экспериментов

Нормальная скорость пламени определялась методом начального участка и рассчитывалась по формуле

$$S_u = S/E_i, \quad (1)$$

где $E_i = \sum m_b T_b / \sum m_i T_i$ — коэффициент расширения продуктов сгорания, $\sum m_b, T_b$ и $\sum m_i, T_i$ — общее число молей и температура продуктов сгорания и свежей смеси; S — видимая скорость пламени [4, 5]. Для опре-

деления S проводилась покадровая съемка распространения пламени на ранней стадии горения в сферической бомбе диаметром 183 мм. Коэффициент расширения рассчитывался методом Хоттеля и др. [6].

Горючая смесь составлялась непосредственно в бомбе по парциальным давлениям. Водяной пар генерировался в отдельном испарителе и дозировался по манометру. При высоких давлениях с целью контроля воспроизводимости опытов использовался также метод ампул. Ампула с определенным количеством воды помещалась в бомбу и разбивалась с помощью специального устройства. Содержание в смеси добавок H_2O и N_2 — f_{H_2O, N_2} — определялось отношением парциального давления добавки к общему давлению, а содержание метана по отношению к воздуху во всех опытах оставалось постоянным и равным $p_{CH_4}/p_{воздух} = 0,105$. Результаты опытов по влиянию давления и добавок воды на скорость пламени приведены на рис. 1, где представлены осредненные значения скоростей в 3—5 опытах. Воспроизводимость результатов $\pm 5\%$ при $S_u = 70 \div 10$ см/сек и $\pm 8\%$ при $S_u = 10 - 3$ см/сек.

Из сопоставления с данными по нормальным скоростям сухих метановых смесей разного состава [5] можно отметить, что действие добавки воды сравнимо с обеднением смеси с той разницей, что в смесях с добавкой воды сохраняется отношение метана к кислороду. Аналогично сухим метано-воздушным смесям, нормальная скорость пламени уменьшается с ростом давления, причем при данной добавке воды барический показатель степени в зависимости $S_u \sim p^n$ уменьшается по мере роста давления. Большей добавке воды соответствует более значительное снижение показателя n .

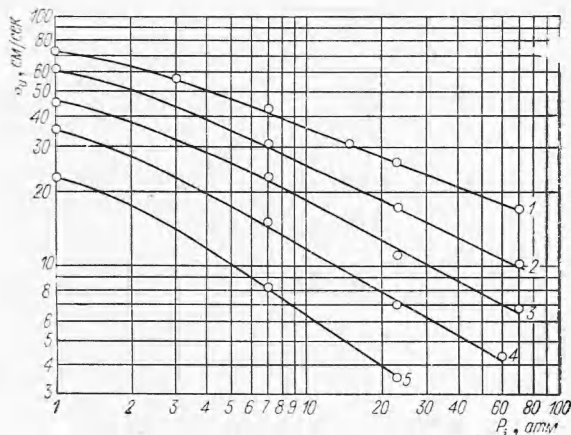


Рис. 1. Зависимость S_u от давления и добавки воды при $T_i = 200^\circ C$.

f_{H_2O} : 1 — 0; 2 — 0,05; 3 — 0,10; 4 — 0,15; 5 — 0,20.

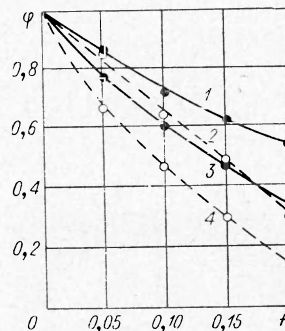


Рис. 2. Зависимость ϕ от добавки воды и азота и давления при $T = 200^\circ C$.

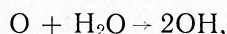
1 — 1 атм, N_2 ; 2 — 1 атм, H_2O ; 3 — 15 атм, N_2 ; 4 — 15 атм, H_2O .

На рис. 2 приведены результаты сравнения эффективности добавок паров воды и азота на метано-воздушное пламя. Величина ϕ представляет отношение нормальной скорости пламени с добавкой к скорости без добавки. Из рис. 2 видно, что с ростом давления эффективность обеих добавок увеличивается, причем пары воды сильнее снижают скорость пламени как при атмосферном, так и повышенных давлениях.

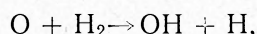
Обсуждение результатов

С целью выяснения возможности промотирования горения добавками воды была проведена серия опытов с заменой воды азотом (см. рис. 2). Как следует из тепловой теории распространения пламени, пре-

вышение средней по температуре скорости реакции с добавкой воды над скоростью с добавкой азота должно привести с учетом изменения теплопроводности и теплоемкости к условию $\varphi_{\text{H}_2\text{O}} > \varphi_{\text{N}_2}$. Однако этого не наблюдается даже при малых добавках воды, где относительное понижение температуры пламени по сравнению с азотом еще невелико. (При $f_{\text{H}_2\text{O}}=0,05$ понижение температуры составляет 30° .) Отсутствие промотирующего эффекта воды при добавках менее 2% следует также из результатов работы [7]. С точки зрения тепловой теории это можно объяснить тем, что при температуре, близкой к максимальной, определяющей суммарную скорость реакции, имеется значительное количество продуктов реакции — воды и водорода. Увеличение скорости вероятной реакции разветвления



обусловленное добавкой воды, вносит относительно малый вклад по сравнению с аналогичной реакцией и водой — продуктом, а также реакцией



идущей с меньшей энергией активации.

При 20%-ной добавке воды понижение температуры пламени достигает 90° , что и определяет значительную разницу в значениях скоростей пламени в области больших добавок воды и азота. Характерно, что именно понижение температуры в случае добавок воды приводит к более низким значениям равновесных концентраций атомарного водорода и кислорода при почти неизменной концентрации гидроксила.

В заключение необходимо отметить влияние излучения и естественной конвекции на погрешности и ограничения при определении скорости пламени. Хотя большие добавки воды и давления обуславливают высокую поглощательную способность газов, как показывают оценки, пренебрежение излучением не может привести к грубым ошибкам в условиях настоящих экспериментов. В случае наибольшего влияния излучения (смесь с 20% воды при 70 атм) максимально возможное понижение

температуры пламени при диаметре очага 3 см и степени черноты $\epsilon=0,4$ составляет 200° ($\Delta S_u/S_u=0,1$). С другой стороны, максимальный подогрев смеси, имеющий место, когда излучение полностью поглощается в узком прилегающем к пламени слое свежего газа, равен 300° ($\Delta S_u/S_u=0,65$). В действительности, погрешность расчета S_u по формуле (1) будет меньше, если учесть, что на участке измерения видимой скорости величина ϵ изменяется от 0 до 0,4, а также, что характерная длина пути поглощения свежего газа порядка внутреннего диаметра бомбы.

Что касается конвекции, то при больших добавках воды и давления она оказывает существенное влияние как на точность определения скорости пламени, так и на процесс горения в целом. При скорости конвективного подъема пламени S_c , равной видимой скорости уже на ранней стадии распространения пламени, после воспламенения наблюдается ха-

рактерная деформация поверхности. Нижняя часть сферы пламени приобретает плоскую или вогнутую форму (рис. 3). Скорость пламени, определенная по вертикальному размеру, меньше скорости, определен-

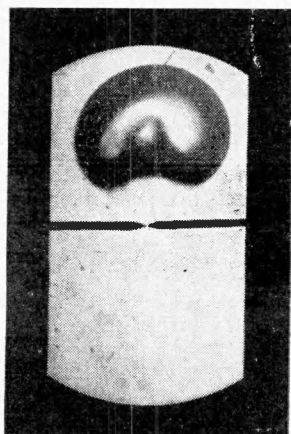


Рис. 3. Подъем и форма пламени в условиях сильного влияния конвекции.

ной по горизонтальному. Поскольку введение поправки на конвекцию не представляется возможным, диапазон использованных давлений и добавок воды ограничивался условием $S \geq S_c$.

Поступила в редакцию
4/III 1971

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. Н. Делягин. Сб. «Новые методы сжигания топлив и вопросы теории горения». М., «Наука», 1965, стр. 72.
2. Н. Чирков. Докл. АН СССР, 1944, XV, 6.
3. D. K. Kuehe. ARS, J., 1962, 32, 11.
4. В. С. Бабкин, Л. С. Козаченко, И. Л. Кузнецов. ПМТФ, 1964, 3.
5. В. С. Бабкин, Л. С. Козаченко, ФГВ, 1966, 2, 3.
6. H. C. Hottel, G. C. Williams, C. N. Satterfield. Thermodynamic charts for combustion processes. N. Y.—London, 1956.
7. I. Fellsand A. G. Rutherford. Combustion and Flame, 1969, 13, 2.

УДК 536.46

АЭРОДИНАМИКА ЛАМИНАРНЫХ ДИФФУЗИОННЫХ ПЛАМЕН

Л. П. Ярин
(Ленинград)

Для процесса напряженного горения неперемешанных газов характерно наличие выраженного фронта пламени, разграничивающего поле течения на две области, в одной из которых присутствуют топливо и продукты сгорания, а во второй — окислитель и продукты сгорания. Структуре такого факела отвечают совершенное смешение компонентов и бесконечно большая скорость химической реакции на фронте пламени. Наличие в каждой из двух областей только одного реагента позволяет эффективно использовать модель Бурке — Шумана — Зельдовича [1, 2] для определения основных характеристик газового факела [3, 4]. Ниже в рамках этой же модели рассматривается аэродинамика ряда характерных типов прямоструйных ламинарных газовых пламен — свободного, полуограниченного и распространяющегося в спутном однородном потоке. Решение проводится в рамках теории пограничного слоя на основе обобщенной схемы расчета диффузионного факела [4].

1. Рассмотрим аэродинамику плоского ламинарного факела, образующегося при истечении струи газа из узкой и достаточно протяженной щели. Будем полагать, что давление постоянно во всей области течения, $\mu = \text{const}$, а число Льюиса равно единице. Последнее позволяет ограничиться решением только динамической и диффузионной задачи. Не будем также учитывать изменение молекулярного веса в процессе реакции.

При принятых допущениях задача сводится к интегрированию следующей системы уравнений:

$$\begin{aligned} \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho V \frac{\partial u}{\partial y} &= \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right), \quad \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho V}{\partial y} = 0, \\ \rho u \frac{\partial \widetilde{\Delta c}}{\partial x} + \rho V \frac{\partial \widetilde{\Delta c}}{\partial y} &= \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho D \frac{\partial \widetilde{\Delta c}}{\partial y} \right); \end{aligned} \quad (1)$$