

УДК 536.46

ВЛИЯНИЕ ПРИМЕСИ CO₂ К ТОПЛИВУ НА ГОРЕНИЕ ГАЗОВЫХ СТРУЙ В ВОЗДУХЕ

В. К. Баев, А. Н. Бажайкин

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН, 630090 Новосибирск
baev@itam.nsc.ru

Описаны результаты экспериментального исследования влияния примеси CO₂ к метану и пропан-бутановой смеси на условия стабилизации диффузионного пламени в воздухе. Показано, что с ростом концентрации CO₂ в топливе существенно увеличивается длина отрыва пламени, в основном вследствие изменения скорости и концентрации в районе точек «поджога» и в меньшей степени вследствие увеличения характерного времени горения. Получены данные по влиянию примеси CO₂ к топливу в количествах, превышающих расход топлива до ≈1.5 раз, на характерное время горения.

Ключевые слова: топливная струя, характерное время горения, отрыв, длина отрыва, нормальная скорость пламени, критериальное описание.

ВВЕДЕНИЕ

Исследования влияния примеси различных газов к углеводородным топливам ведутся многие десятилетия, что связано, несомненно, с практической необходимостью использования топлив сложного химического состава.

В последнее время интерес обострился, возможно, в связи с расширением использования сланцевого газа, биогаза и других горючих газов, содержащих балластные примеси (CO₂, N₂). Поэтому вопрос о влиянии примеси, в частности CO₂, на макрокинетические характеристики горения топлива, в первую очередь на нормальную скорость пламени u_n , весьма актуален.

Для практического применения рекомендуется, например, следующая зависимость [1], используемая при содержании балласта более 5 %:

$$u_n = u_{n0}(1 - 0.01[N_2] - 0.012[CO_2]), \quad (1)$$

где $[N_2]$, $[CO_2]$ — объемное содержание балластных газов в топливе, %, u_{n0} — нормальная скорость пламени чистого топлива. При этом необходимо знать, как геометрия и устойчивость турбулентного пламени, зачастую в сложных газодинамических условиях и в отсутствие полного перемешивания, зависят от нормальной скорости пламени u_n или другой макрокинетической характеристики.

В одной из последних работ [2] получена богатая экспериментальная информация и

подчеркнута роль газодинамической структуры потока, но использованная экспериментальная модель (сопло с толстыми кромками) представляется не совсем удачной для интерпретации полученных результатов с точки зрения их влияния на макрокинетические характеристики.

В работе [3] показано, что корректность в организации течения даже затопленных струй, без спутного потока, — весьма важный фактор.

Характерное время горения сложных топлив можно определять экспериментально, как это сделано в [4], можно использовать обобщенные критериальные зависимости либо измерение характерных частот колебаний фронта пламени.

Наиболее удобным представляется измерение длины отрыва диффузионного пламени горячей затопленной струи газообразного топлива в воздушной среде. Правда, при этом характерное время горения определяется при коэффициенте избытка воздуха, близком к минимальному для данных температуры и давления. Но зато опорные зависимости достаточно точны, и можно ожидать, что они применимы и к топливным смесям различного состава при достаточно корректном описании газодинамики и модели турбулентного горения в этих условиях [5].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Установка, схематично изображенная на рис. 1, в отличие от описанной в [3], содер-

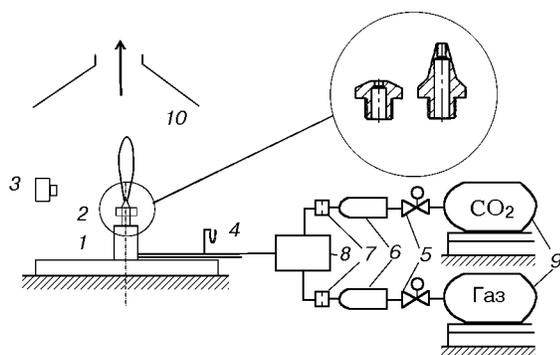


Рис. 1. Схема установки:

1 — форкамера, 2 — сопло, 3 — фотокамера, 4 — перепадомер на сопле, 5 — редуктор, 6 — объемный счетчик ГСБ-400, 7 — жиклеры, 8 — смеситель, 9 — весы, 10 — вентиляция

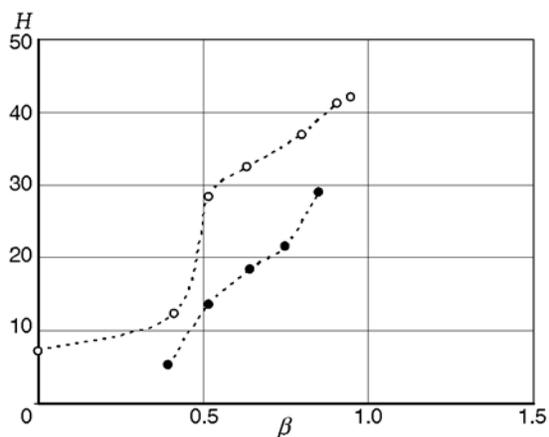
жит дополнительный смеситель горючего газа с CO_2 , представляющий собой цилиндрическую камеру с напуском газов через два жиклера диаметром $\varnothing 0.2$ мм. Такой размер жиклеров выбран в целях реализации на них сверхзвуковых перепадов давления для удобства независимого регулирования каждого из расходов и для обеспечения интенсивного смешения газов перед соплом.

Тарировку жиклеров проводили с использованием газового объемного счетчика ГСБ-400 и весовым методом. Это позволяло определять не только расходную характеристику жиклера, но и плотность газа. Длину отрыва пламени h измеряли по фотографии, увеличенной на дисплее примерно в три раза.

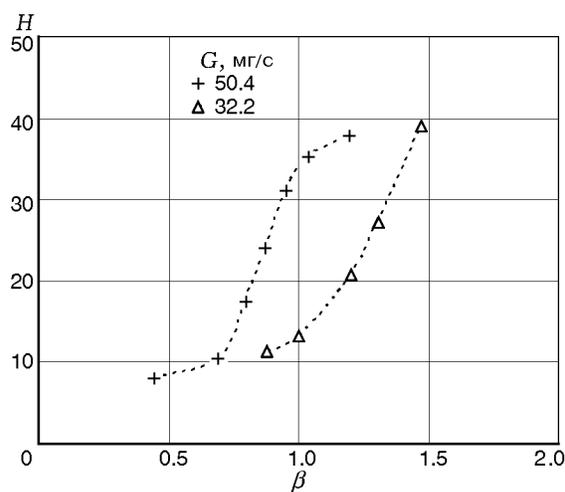
Использовались сопла диаметром $d = 2.5$ мм с плоской и конической головной частью. Расход топлива (G_f) в основном задавался постоянным. Расход CO_2 (G_{CO_2}) варьировался от нуля до срывного значения. Отношение расходов $\beta = G_{\text{CO}_2}/G_f$ изменялось в диапазоне $0 \div 1.5$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ АНАЛИЗ

Изменение безразмерной длины отрыва ($H = h/d$) пламени метана при варьировании величины β и использовании сопел разной геометрии представлено на рис. 2. Результаты измерений свидетельствуют о влиянии внешней конфигурации сопла на условия стабилизации пламени затопленной струи, причем длина отрыва растет с увеличением добавки CO_2 в топливо.

Рис. 2. Влияние примеси CO_2 к метану на длину отрыва пламени для разных сопел:

○ — коническое сопло, ● — с плоским торцом; $G_f = 38$ мг/с

Рис. 3. Влияние примеси CO_2 к пропан-бутану на длину отрыва пламени (коническое сопло)

На рис. 3 приведены данные для конического сопла при двух значениях расхода пропан-бутана (массовое соотношение 70/30). Видно, насколько сложным образом добавка CO_2 влияет на длину отрыва H — через изменение скорости истечения, изменение положения поверхности концентрации, на которой располагаются точки «поджога», а также через возможное изменение макрокинетических характеристик и температуры продуктов сгорания.

Для обработки данных по влиянию добавки CO_2 к топливу на макрокинетические характеристики, такие как характерное время го-

рения τ и нормальная скорость распространения пламени u_n , использовали критерий гомохронности, который выражается в виде зависимости $Ho(H)$, полученный в [3]:

$$Ho = \frac{cH}{n} \left(\alpha L_0 + 1 - \frac{2cH}{3} \sqrt{\frac{\rho}{\rho_0}} \right),$$

где $c = 0.27$ — эмпирический коэффициент, ρ_0 и ρ — плотности топлива и горючей смеси, $n = \sqrt{\rho_0/\rho}$, α — коэффициент избытка воздуха, L_0 — стехиометрический коэффициент. Параметр $\alpha L_0 = G_a/G_f$ (где G_a — расход воздуха) связан с концентрацией топлива в смеси (K) известным соотношением $K = 1/\alpha L_0 + 1$.

При добавке CO_2 к топливу концентрация топлива в смеси определяется по формуле

$$K = \frac{1}{1 + \alpha L_0 + \beta}, \quad (2)$$

а критерий гомохронности принимает вид

$$Ho_c = \frac{cH}{n} \left(\alpha L_0 + 1 + \beta - \frac{2cH}{3} \sqrt{\frac{\rho}{\rho_0}} \right). \quad (3)$$

Для расчета по (3) использовали измеренные в эксперименте значения длины отрыва H при заданном значении β в предположении $\alpha = 1$, характерном для точек «поджога» [3]. Критерий гомохронности для чистого топлива выражается известной формулой $Ho = u_0\tau/d$, где u_0 — скорость истечения из сопла топливной струи, τ — характерное время горения, затабулированное в [4] для чистых топлив в виде зависимости $\tau(\alpha)$, которая принимает минимальные значения τ_{\min} при $\alpha \approx 1$ для данного состава и температуры смеси. Критерий Ho_c соответствует топливу с добавкой CO_2 , а критерий Ho — чистому топливу, $\tau_{\beta=0}$. На рис. 4 представлены результаты расчетов Ho_c и Ho для пропан-бутана и метана (каждая точка соответствует одному и тому же эксперименту). Почти все экспериментальные точки лежат выше прямой $Ho_c = Ho$. Это означает, что $Ho_c > Ho$ и, соответственно, характерное время горения топлива с добавкой CO_2 ($\tau_{\beta \neq 0}$) больше, чем при горении чистого топлива ($\tau_{\beta=0}$), поскольку остальные факторы учтены в (3). Пропорциональность критерия гомохронности характерному времени горения выражается в виде

$$\frac{Ho_c}{Ho} = \frac{\tau_{\beta \neq 0}}{\tau_{\beta=0}}. \quad (4)$$

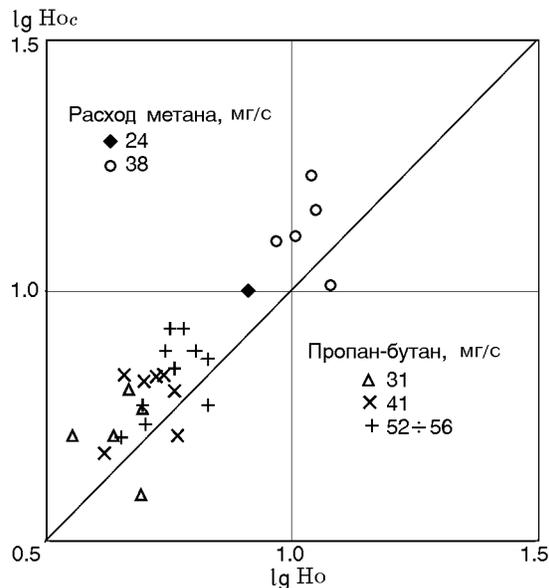


Рис. 4. Сравнение рассчитанного по (3) критерия гомохронности (ось ординат) с вычисленным по τ_{\min} (ось абсцисс) для двух видов топлива при разных расходах

Отсюда можно определить $\tau_{\beta \neq 0}$ по приведенным в [4] значениям $\tau_{\beta=0}$ при минимальном коэффициенте избытка топлива и по отношению Ho_c/Ho , определенному из рис. 4.

На рис. 5 и 6 приведены зависимости $\tau(\beta)$ для пропан-бутановой и метановой смесей с добавкой CO_2 . Пунктирными линиями отмечены уровни изменения τ при горении чистых топлив, соответствующие диапазонам изменения

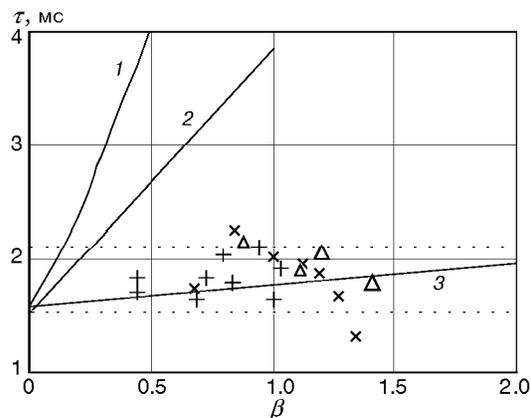


Рис. 5. Влияние примеси CO_2 к пропан-бутану на характерное время горения:

расход пропан-бутана: Δ — 31 мг/с, \times — 41 мг/с, $+$ — 52 мг/с; 1 — $\tau \approx a/u_n^2$, 2 — $\tau \approx \delta_{cr}/u_n$, 3 — $\tau = f(\beta)$ (4)

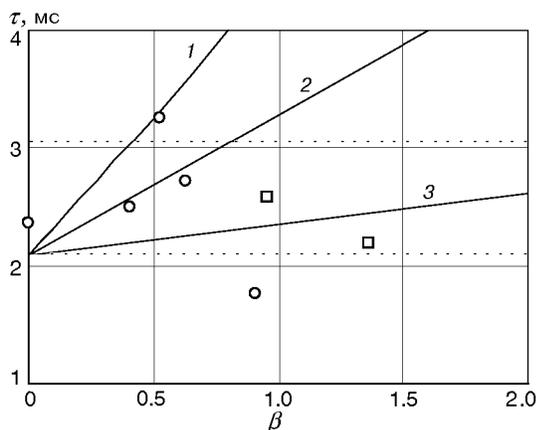


Рис. 6. Влияние примеси CO_2 к природному газу (метан) на характерное время горения:

расход метана: \square — 24 мг/с, \circ — 38 мг/с; 1 — $\tau \approx a/u_n^2$, 2 — $\tau \approx \delta_{cr}/u_n$, 3 — $\tau = f(\beta)$ (4)

α в экспериментах, что дает приближенную оценку влияния CO_2 как инертного разбавителя.

Уравнение (1) вполне удовлетворительно описывает экспериментальные данные по нормальной скорости горения стехиометрических метано- и пропановоздушных смесей [6, 7]. Это иллюстрирует рис. 7, где показана зависимость нормальной скорости горения от концентрации топлива. Поскольку горение в струях топлива происходит в зоне стехиометрического состава, представленная обобщенная зависимость может быть использована для оценки характер-

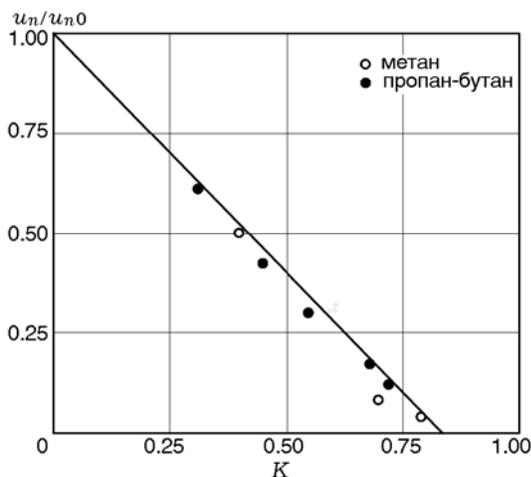


Рис. 7. Относительное изменение нормальной скорости в зависимости от концентрации CO_2 в топливе (обработка экспериментальных данных)

ного времени горения. Для плоского нормального пламени

$$\tau \approx a/u_n^2, \quad (5)$$

где a — коэффициент температуропроводности. Величина a довольно слабо зависит от β , поэтому на рис. 5 и 6 верхние кривые построены в соответствии с (5) при $a \cong \text{const}$, а скорость $u_n(\beta)$ вычислялась по уравнению (1). Очевидно, что такой способ оценки дает сильно завышенные результаты.

По-видимому, оценка будет более корректной, если предположить, что характерное время горения связано с критической толщиной пламени (δ_{cr}) и его нормальной скоростью соотношением

$$\tau \approx \delta_{cr}/u_n. \quad (6)$$

Это соответствует характерному времени горения для растянутых пламен, а именно в них измерялись значения τ , затабулированные для пяти топлив в [4] и используемые при критериальном описании геометрии и устойчивости пламен. Кроме того, это соответствует идеологии горения в турбулентном потоке [5]. Для расчета по формуле (6) использовались значения δ_{cr} , затабулированные в [8], а скорость u_n вычислялась из уравнения (1). Результаты расчетов (кривая 2) и их аппроксимация по формуле (4) (кривая 3) представлены на рис. 5, 6. Видно, что аппроксимация в большей степени соответствует полученным экспериментальным данным, хотя для пропан-бутана корреляция хуже, чем для метана.

Справедливость высказанных предположений и сделанных оценок следует, по-видимому, проверить более тонкими экспериментальными исследованиями. Тем не менее вышеизложенное дает основания полагать, что для практических целей можно предложенным методом оценивать влияние примеси CO_2 к различным газообразным топливам на процесс его горения. Имеющиеся обширные литературные данные по влиянию добавки CO_2 и других газов к топливу на нормальную скорость пламени можно указанным способом использовать при расчете и моделировании процессов горения в практических устройствах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведено измерение длины отрыва диффузионных пламен, образующихся при истечении газообразного топлива с примесью

СО₂ в воздух в диапазоне отношений массового расхода СО₂ к расходу топлива $\beta = 0 \div 1.5$.

2. Показано, что влияние примеси СО₂ к топливу на макрокинетическую характеристику — характерное время горения — относительно невелико и приближенно может быть оценено как величина, обратно пропорциональная нормальной скорости пламени.

3. Предложенная оценка позволяет использовать данные по влиянию различных примесей на нормальную скорость пламени для определения характерного времени горения, являющегося основой для критериального описания геометрии и устойчивости турбулентных пламен.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Иссерлин А. С.** Основы сжигания газового топлива: справ. пособие. — Л.: Недра, 1987.
2. **Min J., Baillot F.** Experimental investigation of the flame extinction processes of nonpermixed methane flames inside an air coflow diluted with CO₂, N₂, or Ar // *Combust. Flame.* — 2012. — V. 159, N 12. — P. 3502–3517.
3. **Баев В. К., Бажайкин А. Н.** Уточнение критериального описания стабилизации пламени при горении газовых струй // *Физика горения и взрыва.* — 2014. — Т. 50, № 2. — С. 3–8.
4. **Баев В. К., Третьяков П. К.** Характерные времена горения топливо-воздушных смесей при атмосферном давлении // *Физика горения и взрыва.* — 1968. — Т. 4, № 3. — С. 367–376.
5. **Баев В. К., Третьяков П. К.** Расчет положения пламени в турбулентном потоке // *Изв. СОАН СССР. Сер. техн.* — 1969. — № 3, вып. 1. — С. 32–37.
6. **Qiao L., Gan Y., Nishiie T., Dahm W. J. A., Oran E. S.** Extinction of premixed methane/air flames in microgravity by diluents: Effects of radiation and Lewis number // *Combust. Flame.* — 2010. — V. 157, N 8. — P. 1446–1455.
7. **Munteanu V., Oancen D., Răzus D.** Carbon dioxide as inhibitor for ignition and flame propagation of propan-air mixtures // *Rev. Roumaine Chimie.* — 1992. — 37.95.2, N 1. — P. 141–146.
8. **Льюис Б., Эльбе Г.** Горение, пламя и взрывы в газах. — М.: Мир, 1968.

*Поступила в редакцию 24/VI 2013 г.,
в окончательном варианте — 17/XII 2013 г.*