

ВЗРЫВНАЯ МОДЕЛЬ МЕДЛЕННОГО ГОРЕНИЯ СМЕСЕЙ ГАЗООБРАЗНЫХ УГЛЕВОДОРОДОВ С ВОЗДУХОМ

Ю. В. Туник, Г. Д. Смехов

Институт механики МГУ, 119899 Москва

Предложена взрывная модель расчета скорости стационарного распространения ламинарного горения в смесях воздуха с комбинированным топливом, составленным из различных газообразных углеводородов. Необходимые формулы получены из рассмотрения структуры фронта пламени на основе диффузионно-тепловой теории. В отличие от известных соотношений предлагаемая модель не содержит неопределенности в выражении для скорости тепловыделения при горении углеводородов. Расчеты проведены для метановодородовоздушных смесей. Модель описывает основные качественные результаты экспериментов по стационарному распространению ламинарного горения и дает приемлемое количественное согласование с экспериментом для смесей газообразных углеводородов с воздухом.

Современные теоретические исследования распространения медленного горения в газах и газовзвесах, как правило, предполагают включение в математическую модель всех известных процессов, влияющих на картину течения. При этом используются уравнения Навье — Стокса во всей рассматриваемой области с учетом диффузии компонентов, турбулизации потока и максимально полные схемы химических реакций [1–4]. Популярность такого детального моделирования объясняется надеждой точно рассчитать состав смеси в любой момент времени. Однако всегда остаются вопросы об адекватности кинетической схемы, о неопределенности констант скоростей элементарных химических реакций, о пригодности модели турбулентности и т. д. Возникают непростые проблемы, связанные с выбором численного метода, правильностью его реализации. Поэтому приходится с осторожностью говорить о корректности получаемых результатов.

В то же время в задачах по распространению горения со сложной газодинамикой модель бесконечно тонкого фронта пламени может оказаться не менее плодотворной, так как ее использование, например, в газовзвеси угольной пыли позволяет уделить больше внимания процессам межфазного взаимодействия и гетерогенного горения. В нестационарном случае нормальная скорость пламени может рассматриваться как его скорость относительно газа. Поэтому важно, чтобы модель достаточно точно описывала зависимость этой скорости от пара-

метров набегающей смеси.

Диффузионно-тепловая теория приводит к простым формулам для расчета нормальной скорости стационарного распространения ламинарного горения (см., например, [5]). Соответствующие решения Я. Б. Зельдовича, Д. А. Франк-Каменецкого, А. В. Бондаренко и других авторов существенно опираются на представление о том, что тепловыделение может быть описано одним неравновесным процессом. Однако тепловой эффект и скорость этой суммарной реакции не определены даже для случая простого газообразного топлива. Например, процесс горения метана ($\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 = \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$) реально включает большое количество элементарных химических реакций. Поэтому упомянутые выше соотношения для скорости пламени могут быть использованы, если определены скорость тепловыделения W как функция температуры газа T и теплоподвод Q , учитывающий реальный состав продуктов горения.

В [6] предложена взрывная модель воспламенения газа и тепловыделения во фронте пламени, позволяющая выписать явное выражение для скорости тепловыделения $W(T)$ и нормальной скорости распространения горения. При этом расчетные значения скорости фронта пламени хорошо согласуются с экспериментальными данными, полученными при нормальных условиях для смесей воздуха как с метаном, так и с этаном. Некоторое отличие заключается в том, что в экспериментах максимум скорости пламени несколько смещен в сторону более бо-

гатых смесей. Еще более значительное отклонение наблюдается в водородовоздушных смесях.

В настоящей работе взрывная модель воспламенения и горения газа во фронте пламени адаптирована для смесей, горючая часть которых состоит не из одного, а из нескольких газообразных углеводородов. Предложена ее модификация, которая смещает максимум нормальной скорости распространения пламени в сторону богатых смесей.

Рассмотрение структуры фронта пламени в предположении о взрывном воспламенении газа в [6] показало, что скорость стационарного распространения горения u_f вычисляется по формуле

$$u_f^2 = \lambda Q_f W(T_i) / c_p \rho_0^2 (T_i - T_0). \quad (1)$$

Здесь ρ_0 , T_0 , λ , c_p — плотность, температура, коэффициент теплопроводности и удельная теплоемкость при постоянном давлении газа перед фронтом пламени; Q_f — теплота сгорания единицы массы газообразного топлива; T_i — температура воспламенения, определяемая из уравнения $T_i^2/T_* = T_{\max} - T_i$; скорость тепловыделения задается соотношением

$$W(T_i) = \rho_0 c_p T_i^2 / Q_f T_* \tau(T_i),$$

где T_* — температура, характеризующая энергию активации. Зависимости времени задержки воспламенения τ от термодинамических параметров газа и его состава для различных углеводородов приведены, например, в [7]. Все они имеют схожую структуру:

$$\tau = \xi_f^m \xi_O^n A \exp(T_*/T) p^k,$$

где ξ_f , ξ_O — молярные концентрации углеводорода и кислорода, p — давление газа, атм. Значения параметров m , n , k , T_* , A для метана и водорода приведены в таблице. Размерность коэффициента A в таблице позволяет получить значения τ в секундах.

Газ	m	n	k	T_*	A
CH ₄	0,30	-1,00	-0,7	25 000	10 ⁻¹⁰
H ₂	0,14	-0,56	-0,7	8 600	10 ⁻⁹

Максимальная температура T_{\max} определяется теплотой реакции Q , приходящейся на единицу массы смеси: $T_{\max} = T_0 + Q/c_p$. В обедненных смесях $Q = \xi_{f,0} Q_f$, в обогащенных — $Q = \xi_{O,0} Q_f \nu_{f,0} / \nu_{O,0}$, где $\xi_{f,0}$, $\xi_{O,0}$ — начальные концентрации горючего и кислорода;

$\nu_{f,0}$, $\nu_{O,0}$ — стехиометрические коэффициенты брутто-реакции. Величины Q_f и, следовательно, Q отличаются от соответствующих параметров брутто-реакции $Q_{f,0}$ (теплота брутто-реакции на единицу массы газообразного топлива) и Q_0 (теплота брутто-реакции на единицу массы смеси) из-за неполноты ее завершения и определяются по равновесному составу продуктов горения с использованием методики [8]. Коэффициенты неполноты сгорания $\alpha = Q/Q_0$ для метано- и этановоздушных смесей приведены в [6]. Уравнение для T_i получено в предположении, что в момент воспламенения $dT/dt = (T_{\max} - T_i)/\tau(T_i)$.

Последнее выражение является лишь приближенным значением производной dT/dt . Чтобы его уточнить, достаточно предположить, что в момент воспламенения вся масса газообразного топлива вступает в реакцию. Скорость изменения температуры газа в этот момент определяется концентрацией углеводорода и полным тепловыделением $Q_{f,0}$, т. е. значение T_{\max} в уравнении для температуры воспламенения T_i рассчитывается по формуле $T_{\max} = T_0 + \xi_{f,0} Q_{f,0} / c_p$ как для бедных, так и для богатых смесей. Кроме того, следует учесть, что до воспламенения температура газа поднимается в основном в результате теплопроводности, химические превращения происходят медленно. Поэтому температура воспламенения не должна превышать максимальную температуру равновесного состояния газовой смеси, так как в этом случае конечное состояние достигается до начала заметного тепловыделения.

Описанная модификация взрывной модели приводит к должному смещению максимума нормальной скорости распространения пламени в метановоздушных смесях от стехиометрического состава. На рис. 1 представлены экспериментальные данные, результаты взрывной теории и ее модификации для метано- и водородовоздушных смесей. Предлагаемая модель описывает и экспериментальную зависимость нормальной скорости пламени от температуры и давления невозмущенного газа. Кривые на рис. 2 соответствуют разным значениям начальной температуры T_0 метановоздушной смеси. По форме и расположению максимумов они качественно повторяют поведение экспериментальных кривых [5]. О количественном расхождении можно судить по рис. 3, на котором сравниваются максимальные значения скорости пламени при разных значениях началь-

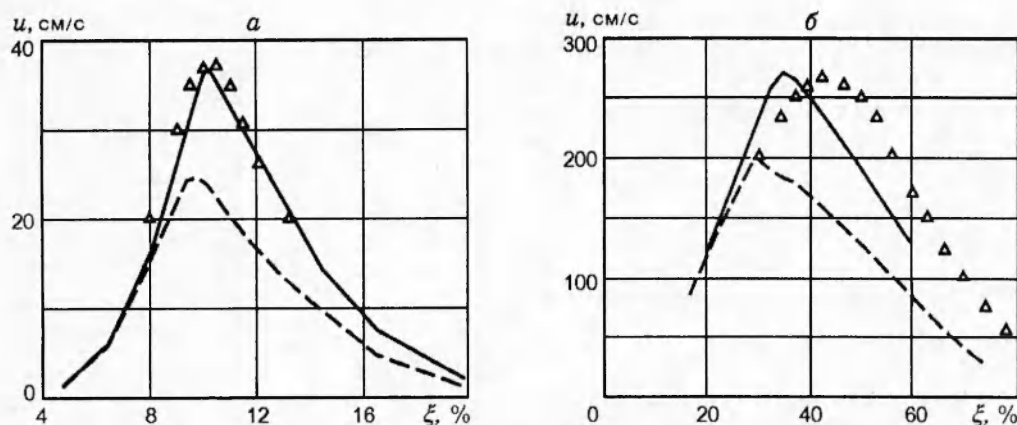


Рис. 1. Нормальная скорость пламени в метановоздушных (а) и водородовоздушных (б) смесях: точки — эксперимент, штриховая линия — взрывная модель, сплошная — ее модификация

ной температуры смеси. При этом зависимость коэффициента теплопроводности от температуры учитывается по данным из справочника [9]. В расчетах получено и отмеченное в эксперименте уменьшение скорости пламени с увеличением давления.

Для комбинированного топлива, состоящего из различных газообразных углеводородов, основные предположения взрывной модели остаются в силе: в момент воспламенения — скорость брутто-реакции определяется с помощью разложения, предложенного Франк-Каменецким, которое учитывает взрывной характер начального этапа тепловыделения, — производная от температуры по време-

ни в момент воспламенения равна отношению $(T_{\max} - T_i)/\tau(T_i)$, где T_{\max} рассчитывается по полной концентрации горючих компонентов без поправки на неполноту их сгорания, а T_i не превосходит максимальной температуры, рассчитываемой по равновесному составу продуктов горения,

— скорости изменения температуры за счет теплопроводности и химических реакций равны. Поскольку в соответствии с принятой моделью в момент воспламенения вся масса газообразного топлива вступает в реакцию, логично предположить, что кислород распределяется пропорционально молярным концентраци-

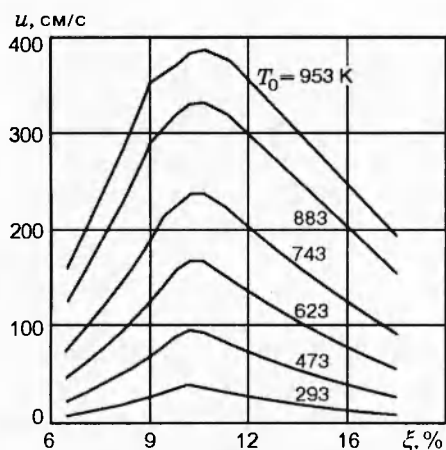


Рис. 2. Зависимость скорости пламени от концентрации метановоздушных смесей для различных значений начальной температуры

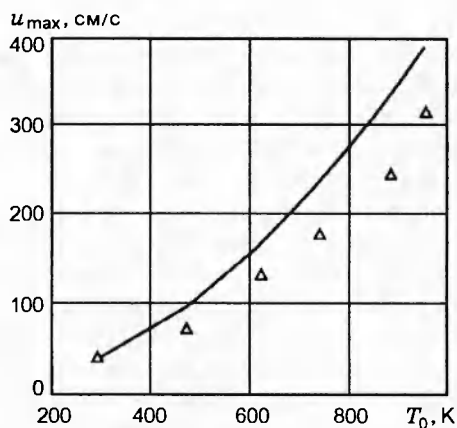


Рис. 3. Зависимость скорости пламени в точках максимумов от начальной температуры метановоздушных смесей:

точки — эксперимент, линия — расчет

ям горючих компонентов. Поэтому в уравнении энергии выражение для скорости суммарного тепловыделения представляется в виде суммы скоростей реакций горения каждого вида топлива:

$$Q_f W(T_i) = \sum_{j=1}^N Q_{f,j} W_j(T_i) = \rho \sum_{j=1}^N \frac{c_p T_i^2 \xi_j'}{T_{*,j} \tau_j}. \quad (2)$$

Здесь индекс j относится к j -й составляющей топлива, N — их число, $\xi_j' = \xi_j / \sum_{l=1}^N \xi_l$.

Таким образом, скорость изменения температуры за счет химических реакций в момент воспламенения определяется по формуле

$$\frac{dT}{dt} = \frac{Q_f W}{c_p \rho} = \sum_{j=1}^N \frac{T_i^2 \xi_j'}{T_{*,j} \tau_j}.$$

Температуру воспламенения можно вычислить исходя из тех же соображений, что и в случае однокомпонентного топлива, если сформулировать дополнительное предположение относительно времени задержки воспламенения многокомпонентного топлива τ : $\tau^{-1} = \sum_{j=1}^N \beta_j' \tau_j^{-1}$. Здесь β_j' — относительные массовые доли каждой из составляющих топлива, которые рассчитываются по их массовым концентрациям β_j : $\beta_j' = \beta_j / \sum_{l=1}^N \beta_l$. Уравнение температуры воспламенения для многокомпонентного топлива принимает вид

$$\sum_{j=1}^N \frac{T_i^2 \xi_j'}{T_{*,j} \tau_j} = \frac{T_{\text{п.а.х}} - T_i}{\tau}.$$

Нормальная скорость стационарного распространения ламинарного пламени рассчитывается по формуле (1), как и для однокомпонентного горючего, а интенсивность тепловыделения $Q_f W(T_i)$ — по соотношению (2).

Представленные на рис. 4 результаты расчетов для смеси метана, водорода и воздуха получены с учетом изменения коэффициента теплопроводности в зависимости от состава смеси по данным справочника [10]. Различные кривые соответствуют разным пропорциям между метаном и водородом. В области богатых смесей кривые ограничены верхними концентрационными пределами воспламенения.

Сравнение с данными монографии [5] позволяет сделать вывод, что предлагаемая модель описывает основные качественные результаты экспериментов по стационарному распро-

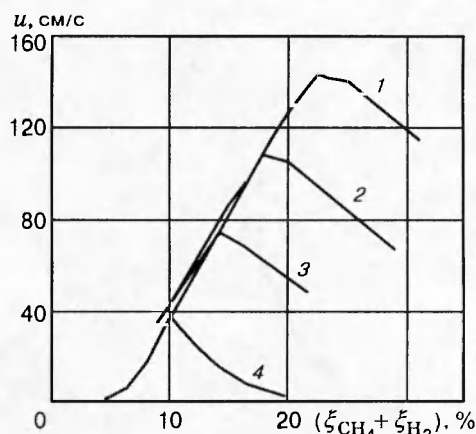


Рис. 4. Нормальная скорость распространения пламени в метановодородовоздушных смесях: $\xi_{\text{CH}_4}' + \xi_{\text{H}_2}'$, %: 1 — 15/85, 2 — 30/70, 3 — 50/50, 4 — 100/0

странению ламинарного горения и дает приемлемое количественное согласование для смесей газообразных углеводородов с воздухом.

Работа выполнена по гранту Томского государственного университета «Фундаментальные проблемы охраны окружающей среды и экологии человека».

ЛИТЕРАТУРА

1. Smirnov N. N., Nikitin V. F., Klammer J., et al. Dust-air mixtures evolution and combustion in confined and turbulent flows // Intern. Symp. on Hazards, Prevention and Mitigation of Industrial Explosions. Norway, Christian Michelsen Research: Prepr. The Seventh Intern. Colloquium on Dust Explosions. 1996.
2. Chen Zhihua, Fan Baochun, Liu Qingming, Li Hongzhi. Shock wave induced by turbulent combustion in suspension // Ibid.
3. Korobeinikov V. P., Markov V. V., Klammer J., et al. The unsteady flows of dusty gases with chemical reactions // Ibid.
4. Krainov A. Yu. Flame propagation in the suspension of combustible particles and gases // Ibid.
5. Хитрин Л. Н. Физика горения и взрыва. М.: Изд-во МГУ, 1957.
6. Tunik Yu. V. A model of low-speed combustion of the methane-air-coal dust suspension // Intern. Symp. on Hazards, Prevention and Mitigation of Industrial Explosions. Norway, Christian Michelsen Research: Prepr. The Seventh Intern. Colloquium on Dust Explosions. 1996.

7. **Заманский В. М., Борисов А. А.** Механизм и промотирование самовоспламенения перспективных топлив // *Итоги науки и техники. Кинетика. Катализ.* Т. 19. М.: ВИНТИ, 1989.
8. **Смехов Г. Д.** Моделирование равновесных и неравновесных состояний многокомпонентного реагирующего газа в газодинамических потоках. М.: ИМ МГУ, 1995. (Препр. № 9-95).
9. **Физические величины:** Справочник / Под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. М.: Атомиздат, 1991.
10. **Варгафтик Н. Б.** Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Физматгиз, 1963.

Поступила в редакцию 23/IV 1997 г.
