

Таким образом, при вибрационном распространении пламени имеется определенное соответствие между колебаниями фронта пламени как целого вдоль оси трубы и волнообразованием на его поверхности. Вибрационное горение почти всегда сопровождается волнообразованием на фронте, точнее говоря, волнообразование на фронте всегда свидетельствует о вибрационном режиме распространения пламени. Однако при низких давлениях возможно вибрационное распространение пламени, несмотря на то, что площадь его поверхности не изменяется, т. е. устойчивость фронта пламени увеличивается. С повышением же давления длина волны на фронте уменьшается, а амплитуда этой волны увеличивается.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ландау Л. Д. ЖЭТФ, 1944, 14, 6, 240.
2. Нестационарное распространение пламени/Под ред. Дж. Маркштейна.— М.: Мир, 1968.
3. Зельдович Я. Б., Баренблатт Г. И., Либрович В. Б. и др. Математическая теория горения и взрыва.— М.: Наука, 1980.
4. Гуссак Л. А., Истратов А. Г., Либрович В. Б. и др. ФГВ, 1977, 13, 1, 19.
5. Алдушин А. П., Каспарян С. Г., Шкадинский К. Г. Докл. АН СССР, 1979, 247, 5, 1112.
6. Чикова С. П. ПММ, 1981, 45, 2, 300.
7. Саламандра Г. Д., Майоров И. И. ФГВ, 1982, 18, 4, 61.
8. Асланов С. К., Аввакумов А. М., Чучкалов И. А.— В кн.: Физика горения и методы ее исследования/Под ред. С. А. Абрикова.— Чебоксары, ЧГУ, 1982.
9. Лазарев П. П., Плешанов А. С. ФГВ, 1983, 19, 1, 23.
10. Петухов Ю. И., Фурсенко А. А. ФГВ, 1984, 20, 6, 40.
11. Самсонов В. П., Кидин Н. И., Абриков С. А. ФГВ, 1984, 20, 6, 61.
12. Рогоза Б. Е. ФГВ, 1986, 22, 2, 57.

Поступила в редакцию 16/І 1987,  
после доработки — 11/У 1987

### ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ МЕТАНОВОЗДУШНОГО ПЛАМЕНИ

*Ю. Н. Шебеко, А. Я. Корольченко, А. Н. Баратов,  
В. Г. Шамонин  
(Москва)*

В настоящее время внимание многих исследователей привлекают работы, связанные с изучением структуры и механизмов распространения газозофазных пламен. Выявлена роль многих элементарных химических актов в газозофазных пламенах ряда горючих веществ: водород, оксид углерода, метан, этан, пропан, ацетилен, этилен и некоторые другие соединения [1—5]. В то же время влияние процессов переноса (теплопроводности и диффузии) изучено недостаточно для прогнозирования поведения пламени. Решение этого вопроса позволит также уточнить границы применимости тепловой теории распространения пламени [6].

Влияние процессов переноса на скорость и структуру пламени изучали в работах [7, 8]. В [7] методом численного моделирования найдено, что при разных коэффициентах диффузии  $D_i$  реагирующих компонентов вблизи их реальных значений нормальная скорость горения  $S_u$  стехиометрического метанозофазного пламени практически не изменяется, в то время как вариация коэффициента теплопроводности заметно влияет на  $S_u$ . Сходные данные получены в [8] также численным моделированием горения. Найдено, что при распространении стехиометрического метанозофазного пламени доминирует тепловой механизм, в отличие от водородозофазного пламени, для которого значительны диффузионные эффекты. В [9] важная роль в распространении пламени в смесях угле-

водородов с воздухом отводится процессам диффузии активных центров в свежую смесь.

В настоящей работе ставится задача численного моделирования распространения пламени и его структуры для стехиометрической метановоздушной смеси с целью детального исследования роли переноса (диффузии и теплопроводности). Кинетическая схема, включающая 23 прямых и 23 обратных реакции, заимствована из [10]. Для решения уравнений, описывающих распространение пламени, использована вычислительная процедура Патанкара — Сполдинга [11, 12]. Теплоемкости отдельных компонентов  $c_{pi}$  аппроксимировались зависимостями вида

$$c_{pi} = a_i + b_i T,$$

где  $T$  — температура;  $a_i$ ,  $b_i$  — эмпирические константы, взятые из [13]. Коэффициенты многокомпонентной диффузии и теплопроводности  $\lambda_i$  определялись аппроксимацией [12, 14] с учетом параметров потенциала Леннарда — Джонса, взятых из [15] или вычисленных по методике [14].

Расчеты проводили до установления квазистационарного режима — стабилизации профилей основных компонентов ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ). Шаг интегрирования по времени, начиная от начального значения  $10^{-7}$  с, увеличивался на 5 % при каждой итерации вплоть до максимальной величины  $10^{-4}$  с. Это оказалось достаточным для устойчивости разностной схемы в задачах, решаемых в настоящей работе (начальная температура 298 К, давление 101 кПа). Для частичного контроля правильности работы программы интегрировали уравнение неразрывности для  $\text{N}_2$  (помимо прочих компонентов смеси) и проверяли условие нормировки по соотношению  $\sum_{j=1}^n Y_j = 1$ , где  $Y_j$  — мольная доля  $j$ -го компонента;  $n$  — число компонентов. Упомянутое выше условие выполнялось с относительной точностью не хуже 1,5 %.

В процессе вычислений найдено, что стабилизация профилей основных продуктов ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ) наступает на 200—800-й итерации в зависимости от расчетного варианта. При этом значения  $S_u$  этих продуктов отличаются друг от друга не более чем на 0,2 см/с. Стабилизация профилей и скоростей таких продуктов, как  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}$ ,  $\text{OH}$ ,  $\text{O}$ , наступает значительно позднее (не ранее 400-й итерации), причем отличие скоростей этих продуктов друг от друга и от основных компонентов достигает 1—2 см/с. Не удалось достигнуть стабилизации профилей  $\text{CNO}$ ,  $\text{CN}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}_2$ . Вероятно, это связано с тем, что погрешность вычислений сравнима с концентрациями этих продуктов. В настоящей работе за величину  $S_u$  принимали скорость основных продуктов ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ).

Результаты расчета структуры метановоздушного пламени при стехиометрическом соотношении горючего и окислителя с реальными коэффициентами переноса представлены на рис. 1 (здесь  $c_i$  — объемная концентрация). При этом  $S_u = 33,6$  см/с. Полученные данные согласуются с результатами расчетов [10] и экспериментов [16], что говорит об их достоверности и надежности. Получено, что для  $\lambda_i = 0$  величина  $S_u$ , хотя и значительно уменьшается (до 11,4 см/с), остается все же сравнимой с первоначальной и превышает характерную для распространения околопредельных пламен величину  $S_u \leq 1$  см/с [6]. Это говорит о возможности распространения пламени в стехиометрической метановоздушной смеси даже в отсутствие теплопроводности. При этом структура пламени (за исключением температурной кривой) мало отличается от случая с реальным коэффициентом теплопроводности. С уменьшением  $D_i$  в 10 раз при неизменном  $\lambda_i$ , равном реальному значению,  $S_u = 33,6 \div 35,4$  см/с, хотя структура пламени (рис. 2) становится существенно иной по сравнению с приведенной на рис. 1. Обращает на себя внимание узкая реакционная зона, характерная для преобладания теплового механизма распространения пламени [6]. Уменьшение  $D_i$  в 100 и 1000 раз приводит к падению  $S_u$  до 19,8 и 4,5 см/с соответственно. При  $D_i = 0$   $S_u \leq 1,5$  см/с, структура

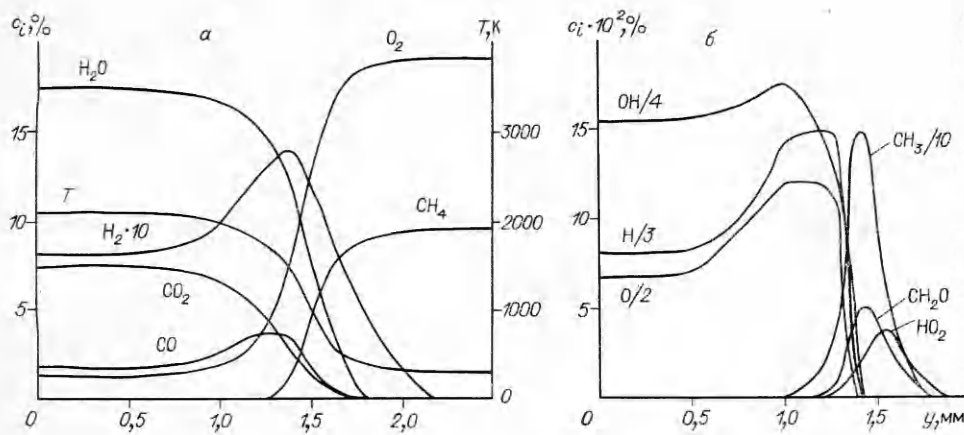


Рис. 1.

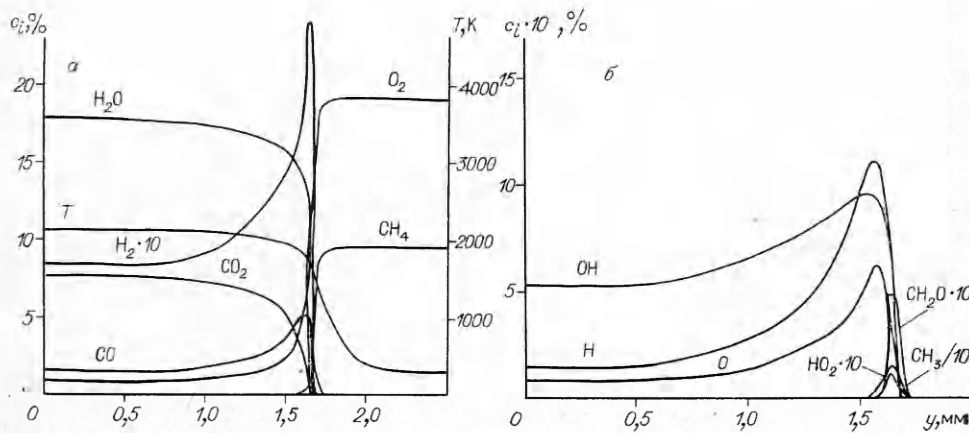


Рис. 2.

пламени при этом аналогична представленной на рис. 2, за исключением температурной кривой, которая характеризуется существенно более медленным падением температуры по направлению к свежей смеси.

Интересно выяснить, диффузия каких реагирующих компонентов оказывает наиболее существенное влияние на распространение пламени. С этой целью выполнены расчеты нормальной скорости горения и структуры пламени, в предположении  $D_i = 0$  для различных компонентов смеси:

	$\text{CH}_4$	$\text{O}_2$	$\text{H}$	$\text{OH}$	$\text{H}$ и $\text{H}_2$
$S_u$ , см/с	31,9	40,4	26,6	31,8	29,0

Приведенные данные показывают, что наибольшую роль в распространении пламени играет диффузия атомарного водорода. Однако эта роль относительно невелика, поскольку изменение  $S_u$  при отсутствии диффузии атомарного водорода составляет лишь около 20%. С другой стороны, когда  $D_i = 0$  для всех компонентов, скорость пламени достигает весьма низких значений. Вероятно, в этом случае играет роль сложное взаимодействие между процессами диффузии и химическими реакциями, механизм которого неясен. Обращает на себя внимание повышение  $S_u$  в случае, когда для молекулярного кислорода  $D_i = 0$ . Данная закономерность обусловлена, вероятно, тем, что при этом зона горения обогащается горючим веществом. Известно [17], что нормальная скорость горения метана имеет максимум не для стехиометрических, а для богатых смесей (при коэффициенте избытка окислителя 0,9). В связи с этим происходит повышение величины  $S_u$ .

К рассмотренным вопросам непосредственно примыкает задача о том, в какой части пламени химические реакции оказывают наибольшее влияние на процесс его распространения. В настоящей работе проведены расчеты нормальной скорости распространения и структуры пламени для случаев, когда константы скоростей всех химических реакций при температурах ниже некоторой критической  $T_{кр}$  полагали равными нулю. Оказалось, что при  $T_{кр} = 800$  К  $S_u = 34,1$  см/с, а при  $T_{кр} = 1200$  К  $S_u = 33,1$  см/с, что близко к значению  $33,6$  см/с, реализуемому при протекании химических реакций во всей температурной области. Соответствующая структура пламени для  $T_{кр} = 1200$  К мало отличается от приведенной на рис. 1.

Из изложенного следует, что химические реакции в предпламенной зоне не оказывают существенного влияния на распространение стехиометрического метановоздушного пламени, что соответствует результатам, полученным в [8]. Из анализа профилей концентраций для этого случая следует, что, несмотря на отсутствие химических реакций в низкотемпературной области пламени, заметная убыль кислорода и метана начинается при температурах, незначительно отличающихся от комнатной. Этот эффект обусловлен влиянием диффузии молекул  $CH_4$  и  $O_2$  в зону горения. Зарегистрированная экспериментально в работе [9] убыль горючего и окислителя в предпламенной зоне при температурах, незначительно отличающихся от комнатной, вероятно, обусловлена этим же эффектом.

Таким образом, в настоящей работе методом численного моделирования горения метана в воздухе изучено влияние процессов переноса на распространение пламени. Выявлено, что при нулевом коэффициенте теплопроводности нормальная скорость горения хотя и падает, но остается выше значений, характерных для околопредельных пламен. Тем самым оказывается возможным распространение пламени без передачи тепла из зоны реакции в предпламенную зону. При нулевых коэффициентах диффузии всех реагирующих компонентов  $S_u \leq 1,5$  см/с. Найдено, что отсутствие химических реакций в предпламенной зоне ( $T < 1200$  К) не приводит к существенному изменению нормальной скорости горения, а убыль концентраций горючего и окислителя при температурах, близких к комнатной, обусловлена диффузией этих компонентов в зону реакции.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Westbrook C. K., Dryer F. L. Comb. Sci. Technol., 1981, 27, 1/2, 1.
2. Басевич В. Я., Когарко С. М., Посвянский В. С. ФГВ, 1977, 13, 2, 193.
3. Басевич В. Я., Когарко С. М., Посвянский В. С. ФГВ, 1976, 12, 2, 217.
4. Warnatz J. Comb. Sci. Technol., 1981, 26, 5/6, 203.
5. Carter N. R., Cherian M. A., Dixon-Lewis G. Notes Numer. Fluid Mechanics, 1982, 6, 182.
6. Зельдович Я. Б., Баренблатт Г. И., Либрович В. Б. и др. Математическая теория горения и взрыва.— М.: Наука, 1980.
7. Tsatsaronis G. Comb. Flame, 1978, 33, 3, 217.
8. Fukutani S., Jinno H. Notes Numer. Fluid Mechanics, 1982, 6, 167.
9. Кеандопуло Г. И. Химия пламени.— М.: Химия, 1980.
10. Smoot L. D., Hecker W. C., Williams G. A. Comb. Flame, 1976, 26, 3, 323.
11. Patankar S. V., Spalding D. B. Heat and Mass Transfer in Boundary Layers.— London: Internat. Textbook Co., 1970.
12. Spalding D. B., Stephenson P. L. Proc. Roy. Soc. (London), 1971, A324, 315.
13. Глушко В. П. и др. Термодинамические свойства индивидуальных веществ.— М.: Наука, 1978.
14. Алексеев В. В. Пограничный слой с химическими реакциями.— М., 1967.
15. Рид Р., Праусниц Д., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей.— Л.: Химия, 1982.
16. Bechtel J. H., Blint R. J., Dash C. J., Weinberger D. A. Comb. Flame, 1981, 42, 2, 197.
17. Parks D. J., Alvares N. J., Beason D. G. Fire Safety J., 1980, 2, 4, 237.

Поступила в редакцию 10/II 1987,  
после доработки — 15/VI 1987