

(13), из которых (12) получено в результате частичной замены  $E_i$  на  $\sigma_e$ , а (13) — путем замены  $\gamma_b$  на  $\dot{E}_i$  и  $\sigma_e$ . Основные соотношения удовлетворяют необходимым и достаточным условиям в начале процесса горения и дают лучшие результаты на начальной стадии, тогда как соответствующие дополнительные — на заключительной стадии процесса. Соотношения с  $\gamma_b = 1$  и  $\gamma_b = \gamma_a$  (15), (17) отвечают предельным значениям скоростей и могут быть использованы для контроля результатов по другим выражениям для доли.

К удовлетворительным результатам для всего процесса приводит комбинированное соотношение (13), не содержащее  $\gamma_b$ . Другое комбинированное соотношение (12) (Фламма и Махе) дает различные результаты в уравнениях разных форм; удовлетворительные в уравнении с видимой скоростью пламени и низкие в уравнении с производной давления (плотности). Незначительное различие в результатах получено по формулам (10) и (14).

Поступила в редакцию  
27/VIII 1968

#### ЛИТЕРАТУРА

1. C. J. Rallis and G. E. B. Tremeer. Combustion and Flame, 1963, 7, 1.
2. В. С. Бабкин, Л. С. Козаченко, И. Л. Кузнецов. ПМТФ, 1963, 6.
3. В. С. Бабкин, Ю. Г. Кононенко. ФГВ, 1967, 3, 2.
4. B. Lewis and G. von Elbe. Combustion. Flames and Explosions of Gases. N. Y.—London. Academic Press, INC, 1961.
5. В. С. Бабкин, А. В. Вьюн, Л. С. Козаченко. ФГВ, 1967, 3, 3.

УДК 536.46

#### ВЫЧИСЛЕНИЕ КИНЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НОРМАЛЬНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ НА ЭВМ

*Д. Б. Ахмедов, В. А. Лобышев, В. В. Померанцев*  
(Ленинград)

При исследовании процессов горения важно определение суммарных кинетических характеристик процессов. Экспериментальное определение этих величин с помощью анализа газовых проб, механически забираемых из реакционной зоны во время развития реакции, неприемлемо для изучения процессов, происходящих во фронте пламени. Известные в настоящее время прямые методы являются слишком грубыми и ненадежными, когда речь идет об изучении процессов, происходящих в зоне, измеряемой долями миллиметра, где сам процесс протекает значительно быстрее, чем в зонах, непосредственно прилегающих к фронту пламени.

В связи с этим весьма важное значение приобретают косвенные методы определения суммарных кинетических характеристик процесса, основанные на измерении нормальной скорости распространения пламени при соответствующих химико-физических условиях протекания процес-

са. Обоснование этих методов неразрывно связано с разработкой теории распространения пламени, в которой была бы выявлена функциональная зависимость между нормальной скоростью распространения пламени и кинетическими параметрами процесса горения.

Во многих работах авторы делали подобные попытки. Однако до последнего времени ни одна теория не включала химическую кинетику в такой форме, которая давала бы возможность по экспериментальным характеристикам пламени определить основные кинетические параметры процесса горения. Только в теории распространения пламени, созданной трудами Н. Н. Семенова, Д. А. Франк-Каменецкого и Я. Б. Зельдовича, роль химической реакции выражена в виде, позволяющем удовлетворительно решать эту задачу. Наглядно показано это в работе О. А. Цухановой [1].

При создании тепло-диффузионной теории нормального распространения пламени авторы пользовались в качестве одной из основных предпосылок допущением о незначительности выгорания до воспламенения и незначительном предпламенном разогреве. Проведенные исследования воспламенения горючей смеси в закрытом сосуде и проточной камере показали, что эти допущения верны только в случае начальных температур, близких к температурам воспламенения. Эксперименты обычно проводятся при комнатной температуре, т. е. при начальных температурах исходной смеси, значительно отличающихся от температуры воспламенения. Поэтому пренебрежение предпламенным разогревом и выгоранием горючего приводит к искажению результатов анализа.

Для исследования процесса горения воспользуемся уравнениями теплового и материального балансов, считая экспоненциальной зависимость скорости реакции от температуры и приняв первый порядок по веществу, находящемуся в недостатке. Физической моделью исследуемого процесса является проточная камера горения, продуваемая потоком однородной горючей смеси. Принимаем, что камера сгорания адиабатична; передача тепла осуществляется в направлении движения газозооудной смеси только теплопроводностью. Скорость движения смеси на бесконечно большом расстоянии от плоского фронта пламени равна нормальной скорости распространения пламени. Тогда, принимается следующая система дифференциальных уравнений горения:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{dx} \left( \lambda \frac{dT}{dx} \right) - \frac{d}{dx} (\omega \cdot c_p \cdot \rho T) + Q_p k_0 c e^{-E/RT} = 0; \\ \frac{d}{dx} \left( \frac{D}{T} \cdot \frac{dcT}{dx} \right) - \frac{d}{dx} (\omega \cdot c) - k_0 c e^{-E/RT} = 0, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности;  $D$  — коэффициент диффузии;  $T$  — температура;  $Q_p$  — теплота реакции;  $c_p$  — удельная теплоемкость;  $\rho$  — плотность;  $k_0$  — константа скорости реакции;  $c$  — концентрация;  $E$  — энергия активации;  $R$  — газовая постоянная;  $\omega$  — скорость течения среды в данной точке.

Граничные условия:

$$\text{при } x = -\infty; \quad T = T_0; \quad c = c_0;$$

$$\text{при } x = +\infty; \quad T = T_{\text{теор}}; \quad c = 0; \quad \frac{dT}{dx} = 0; \quad \frac{dc}{dx} = 0.$$

Как впервые показали Льюис и Эльбе [2] на примере пламени термического разложения озона и в общем виде Я. Б. Зельдович и Д. А. Франк-Каменецкий [4], при некоторых условиях уравнения систе-

мы (1) могут быть приведены к тождественному виду, т. е. оказаться подобными. Исходя из этого, а также предполагая, что  $\lambda$  и  $c_p$  не зависят от температуры, систему (1) можно заменить уравнением вида

$$\lambda \frac{d^2 T}{dx^2} - \omega_0 c_p \rho_0 \frac{dT}{dx} + Q_p k_0 c e^{-E/RT} = 0. \quad (2)$$

Принимая  $\sigma = \frac{c}{c_0}$  — безразмерная концентрация,  $\theta = \frac{T}{T_{\text{теор}}}$  — безразмерная температура,  $\xi = \frac{x k_0}{\omega_0}$  — безразмерная координата, где  $\omega_0$  — скорость течения среды в начальном сечении,  $\frac{E}{T R_{\text{теор}}} = \text{Arr}$  — критерий Аррениуса;  $\frac{Q_p \cdot c}{c_p \cdot \rho} = T_{\text{теор}} - T_0$ ;  $\frac{\omega_0^2}{c \cdot k_0} = \text{Pe}$  — критерий Пекле и  $\sigma = \frac{1 - \theta}{1 - \theta_0}$  — условие подобия полей концентрации и температуры в адиабатическом процессе, получим уравнение (2) в виде

$$\frac{d\theta}{d\xi} = \frac{1}{\text{Pe}} \cdot \frac{d^2\theta}{d\xi^2} + (1 - \theta) \frac{\theta_0}{\theta} e^{-\frac{\text{Arr}}{\theta}}.$$

Граничные условия:

$$\xi = -\infty; \quad \theta = \theta_0; \quad \frac{d\theta}{d\xi} = 0 \quad \text{и} \quad \xi = +\infty; \quad \theta = 1; \quad \frac{d\theta}{d\xi} = 0. \quad (3)$$

Исследование уравнений такого типа [4], показало, что оно имеет стационарное решение при единственном значении критерия Пекле. Задачей решения было не определение кривой изменения температуры по длине камеры сгорания, а нахождение зависимости критерия Pe от начальных условий и свойств смеси:

$$\text{Pe} = f(\text{Arr}; \theta_0).$$

Основной трудностью при машинном решении задачи является некоторая неопределенность граничных условий. При аналитическом решении принимают начало координат во фронте пламени ( $\xi=0$ ).

Для возможности решения уравнения на машине представленных граничных условий не достаточно. Поэтому воспользовались следующим приемом. Предположим, что в начальный момент тепловыделение в результате химического реагирования незначительно, и выберем некоторое значение  $\theta'_0$  так, чтобы  $\theta'_0 - \theta_0 \ll \theta_0$ . Тогда уравнение (3) примет вид

$$\frac{d\theta}{d\xi} \Big|_{\theta = \theta'_0} = \frac{1}{\text{Pe}} \cdot \frac{d^2\theta}{d\xi^2} \Big|_{\theta = \theta'_0}.$$

Проинтегрировав его, получим

$$\frac{d\theta}{d\xi} \Big|_{\theta = \theta'_0} = \text{Pe} (\theta'_0 - \theta_0). \quad (4)$$

Таким образом, для момента  $\xi = \xi'_0$  имеем начальные условия:

$$\theta = \theta'_0 \quad \text{и} \quad \frac{d\theta}{d\xi} \Big|_{\theta = \theta'_0} = \text{Pe} (\theta'_0 - \theta_0).$$

Задача решалась методом последовательных приближений. Подбирались коэффициенты, устанавливающие значение первой производной температуры по времени в начальный момент и критерий Пекле так, чтобы обеспечивалось равенство (4). В случае неправильного выбора этих коэффициентов конечная температура перейдет за теоретическую или не дойдет до нее (рис. 1). Решением уравнения считаем такое значение  $Pe$ , при котором кривая температур асимптотически приближается к теоретической температуре горения ( $\theta=1$ ).

Таким образом производится определение значения критерия Пекле при различных значениях критерия Аррениуса и различных начальных температурах. Задача решалась на аналоговых вычислительных машинах типа МН-7 и ЭМУ-10 и цифровой вычислительной машине БЭСМ-2м.

Значения критерия Пекле в зависимости от начальных характеристик смесей приведены в табл. 1. Результаты, полученные на обоих типах машин, оказались сходными и позволили вывести обобщающую зависимость для реакций первого порядка в виде (рис. 2)

$$Pe = 5,35 \cdot 10^{-2} \cdot \theta_0^5 \exp(-1,5 Arr). \quad (5)$$

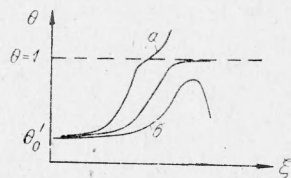


Рис. 1. Метод подбора решения уравнения (3).  
а)  $Pe = d\theta/d\xi$  больше истинного; б)  $Pe = d\theta/d\xi$  меньше истинного.

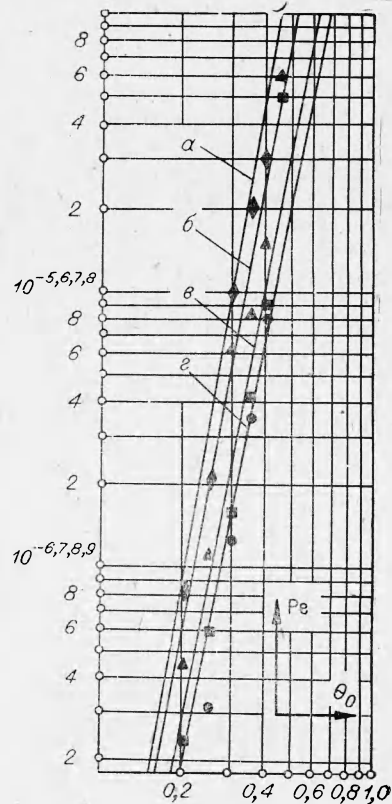


Рис. 2. Решения уравнения (3). Число Аррениуса равно 6 (а), 5 (б), 4 (в) и 3 (г).

Таблица 1

$\theta_0$	Значение критерия Пекле			
	Число Аррениуса			
	3	4	5	6
0,20	$1,25 \cdot 10^{-7}$	$2,37 \cdot 10^{-8}$	$4,5 \cdot 10^{-9}$	$8,55 \cdot 10^{-10}$
0,25	$3,1 \cdot 10^{-7}$	$5,89 \cdot 10^{-8}$	$1,12 \cdot 10^{-8}$	$2,13 \cdot 10^{-9}$
0,30	$1,26 \cdot 10^{-6}$	$1,6 \cdot 10^{-7}$	$6,3 \cdot 10^{-8}$	$1,0 \cdot 10^{-8}$
0,35	$3,5 \cdot 10^{-6}$	$4,2 \cdot 10^{-7}$	$8,4 \cdot 10^{-8}$	$2,1 \cdot 10^{-8}$
0,40	$8,0 \cdot 10^{-6}$	$9,0 \cdot 10^{-7}$	$1,5 \cdot 10^{-7}$	$3,0 \cdot 10^{-8}$
0,45	$5,0 \cdot 10^{-5}$	$5,0 \cdot 10^{-6}$	$6,0 \cdot 10^{-7}$	$1,5 \cdot 10^{-7}$

## ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Пользуясь полученной зависимостью (5), можно определить суммарные кинетические константы процесса горения.

Были обработаны экспериментально определенные значения нормальных скоростей распространения пламени и для ряда газозвушных горючих смесей, представляющих интерес в практическом отношении. Результаты обработки представлены в табл. 2 и на рис. 3, 4, 5.

Таблица 2

Расчетные кинетические константы для ряда горючих смесей

Смесь	Кинетические константы		Источник	Рисунок
	$E$ , кал/моль	$k_0$ , 1/сек		
CO—O <sub>2</sub> —N <sub>2</sub>	23200	$1,4 \cdot 10^{12}$	[6]	3
CO—воздух			[5,7—9]	
CH <sub>4</sub> —воздух	24800	$5,6 \cdot 10^{12}$	[7,10—14]	4
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> —воздух	14700	$4,2 \cdot 10^{11}$	[14]	5

Полученные значения  $E$  и  $k_0$  для рассмотренных смесей находятся в той же области, что и экспериментальные, о чем можно судить по данным для смесей окиси углерода, приведенным в табл. 3, 4.

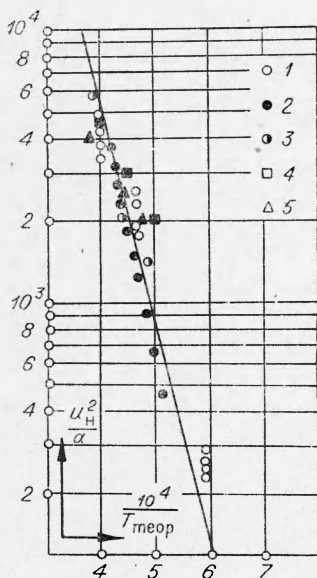


Рис. 3. Обработка CO—воздушных смесей. Данные [6] (1), [7] (2); [8] (3), [5] (4), [9] (5).

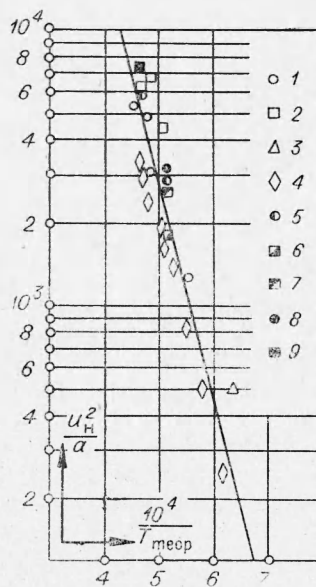


Рис. 4. Обработка CH<sub>4</sub>—воздушных смесей. Данные [10] (1), [14] (2, 3), [11] (4), [7] (5), [14] (6, 9), [12] (7), [13] (8).

Из формулы (5) видно и влияние начальной температуры на нормальную скорость распространения пламени. Действительно

$$u_n \approx \theta_0^{2,5}.$$

Согласно экспериментальным данным Пассауэра [5] и других, показатель степени у начальной температуры меняется от 1,5 до 3.

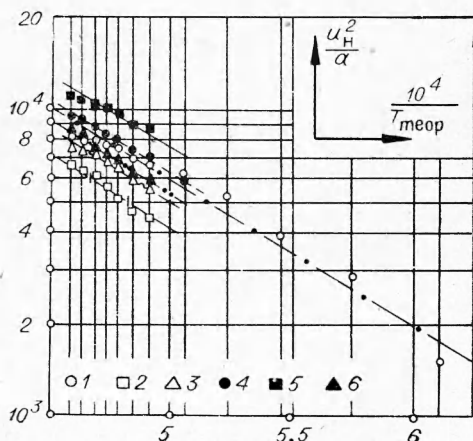


Рис. 5. Обработка  $C_3H_8$  — воздушных смесей.

1 — метод горелки плоского пламени; 2 — бунзенский конус (по шпирным снимкам); 3 — сопловая бунзеновская горелка; 4 — метод теневого конуса (бунзеновская горелка); 5 — метод общей площади (бунзеновская горелка); 6 — метод светящегося конуса (бунзеновская горелка).

Таблица 3

Значения  $E$  для  $CO$  — воздушных смесей

$E$ , ккал/моль	Метод определения	Источник
25	Расчет	[15]
15÷30	Метод потока	[16]
32	Метод капилляра	[17]
24	»	[18]
18÷67	Скорость пламени	[6]
22	»	[19]

Таблица 4

Средние значения  $k_0$  для смесей  $CO$  с кислородом и азотом

$k_0 \cdot 10^{-13}$ , 1/сек	Компоненты смеси	Источник
4,23	$O_2-N_2-CO-2\% H_2O$	[6]
2,91	Воздух — $CO+1,35\% H_2O$	[6]
5,78	Воздух — $CO+1,35\% H_2O+1,5\% H_2$	[6]
4,44	Воздух — $CO-H_2O$	[9]
4,60	Воздух — $CO-H_2O$	[5]
5,10	Воздух — $CO-H_2O$ (метод горелки)	[20]
5,93	Воздух — $CO-H_2O$ (метод бомбы)	[20]

#### ВЛИЯНИЕ РЕЦИРКУЛЯЦИИ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ НА $u_{II}$

В процессе решения было исследовано влияние рециркуляции на нормальную скорость распространения пламени. При исследовании принимались следующие предположения. Рециркуляция производится в адиабатических условиях. Количество рециркулирующего агента с температурой  $T_{теор}$  ( $\theta=1$ ) изменяется от 0 до  $r$ , при этом температура смеси становится равной

$$\theta_r = \frac{\theta' + r}{1 + r},$$

где  $\theta'$  — температура в месте подвода продуктов рециркуляции.

$$\sigma_r = \frac{\sigma - r}{1 + r}.$$

При решении на машине в месте подвода продуктов рециркуляции вводилось возмущение, равное подсчитанным величинам, и подбиралось.

значение критерия  $Pe$  так, чтобы решение удовлетворяло вышеуказанным требованиям.

В результате решения было выявлено, что адиабатическая рециркуляция не влияет на нормальную скорость распространения пламени.

Этот вывод совпадает с экспериментальными данными С. Карра [21], полученными на специальной установке, и данными Д. К. Кюэля, упоминающимися в этой же работе [21].

Подтверждение вывода об отсутствии влияния рециркуляции продуктов сгорания на нормальную скорость распространения пламени позволило уточнить решения по определению критерия Пекле, так как оно (при решении на аналоговой машине) дает возможность работать на более надежном участке блока нелинейности вследствие повышения начальной температуры.

Поступила в редакцию  
27/VIII 1968

#### ЛИТЕРАТУРА

1. О. А. Цуханова. В сб. «Кинетика распространения пламени». М., Изд-во АН СССР, 1959.
2. Б. Льюис, Г. Эльбе. Горение, пламя и взрывы в газах. ИЛ, 1951.
3. Я. Б. Зельдович, Д. А. Франк-Каменецкий. ЖФХ, 1939, 12, 100.
4. А. Н. Колмогоров, М. Г. Петровский, Н. С. Пискунов. Булл. МГУ, секц. А, 1937, 1, 6.
5. Passawer. Gas und Wasserfach, 1930, 73, 15.
6. Г. А. Барский, Я. Б. Зельдович. ЖФХ, 1951, 25, 5.
7. G. Iahn. Der Zündvorgang in Gasgemischen. Oldenbourg, 1934.
8. Г. К. Соболев. Канд. дисс. ЭНИН. М., 1959.
9. Tamman, Thiele. Z. t. anorg. allgem. Chem., 1930, 192, 1.
10. В. Ф. Заказнов. Канд. дисс. М., 1956.
11. H. F. Goward, F. I. Hartwell. J. Chem. Soc., 1932, 2, 2676.
12. A. Egerton, S. K. Thabet. Proc. Roy. Soc. 1955, A, 228, 1174.
13. G. N. Vodami, A. Egerton. Proc. Roy. Soc. A, 1955, 228, 1174.
14. I. P. Botha, D. B. Spalding. Proc. Soc., 1955, 225A, 1160, 71.
15. Я. Б. Зельдович, Н. Н. Семенов. ЖЭТФ, 1940, 10, 12.
16. Н. А. Коржавина. ЖФХ, 1945, 14, 10—11.
17. Г. И. Козлов. Канд. дисс., ЭНИН, М., 1956.
18. Л. С. Соловьев. Отчет Лаборатории интенсификации топочных процессов. ЭНИН АН СССР, 1956.
19. A. Van Tiggelen. Bull. Soc. Chem. Belges, 1949, 58, 259.
20. Л. Н. Хитрин. Физика горения и взрыва. Изд. МГУ, 1957.
21. C. Carr. Revus ge'nerate de thermique, 1963, 17, 609.

УДК 536.46

#### ПРОМОТИРОВАНИЕ ГОРЕНИЯ

*В. Я. Басевич, С. М. Когарко*  
(Москва)

1. Промотирование в отношении процессов высокотемпературного горения углеводородов и водорода представляет большой интерес. Его исследование необходимо с точки зрения практики, так как при работе