

ВЛИЯНИЕ НЕИЗОТЕРМИЧНОСТИ РЕАКТОРА НА УСЛОВИЯ ЗАЖИГАНИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ

Г. А. Арутюнян, Г. А. Маргоян, В. М. Бейбутян, Г. Б. Ростомян
(Ереван)

В закономерностях распространения пламени способ зажигания горючей смеси играет важную роль [1, 2]. В случаях, когда волна горения инициируется вспышкой газовой смеси в высокотемпературной зоне реактора, при установлении температуры зажигания T_z следует учитывать и саморазогрев поджигающего воспламенения $\Delta T = T_z - T_0$, где T_0 — температура стенок в высокотемпературной зоне реактора. Величина ΔT в совокупности с другими параметрами горючей смеси и реактора предопределяет превалирование диффузионного или же теплового механизма в процессе распространения фронта пламени [1—4].

Непосредственное определение температуры быстропротекающего процесса воспламенения связано со значительными трудностями из-за инерционности контактных датчиков температуры и необходимости учета обратной связи между характеристиками датчика и газофазной реакции [5, 6]. В ряде работ при нахождении температуры пламени модельного горения водорода с кислородом применяют численные методы [7—10]. Как показано в [11], корректные результаты в этом случае можно получить лишь при учете «холодных» коммуникаций реактора в общем тепловом балансе реакции. В [12] предложен метод количественной оценки влияния коммуникаций реактора на тепловой режим воспламенения. Таким образом, в [11, 12] указано на ранее неучитываемый фактор неизотермичности, присущий исследуемым принятыми экспериментальными методами газофазным процессам горения.

В настоящей работе поставлена цель посредством предложенного в [12] метода учета неизотермичности определить температуру поджигающего воспламенения гремучей смеси, установить механизм и пределы распространения пламени. Для решения этой задачи поставлен эксперимент по изучению закономерностей инициирования и распространения фронта горения водорода с кислородом, результаты которого сопоставлены со счетом на ЭВМ.

Смесь $2\text{H}_2 + \text{O}_2$ из вакуумной системы (рис. 1) собирается в перепускном объеме ($V = 314 \text{ см}^3$), который находится при комнатной температуре ($T_0 = 300 \text{ К}$), откуда через трубку с сечением $S_c = 0,78 \text{ см}^2$ напускается в промытый плавиковой кислотой кварцевый реактор длиной 115 и диаметром 4,5 см ($V = 1828,5 \text{ см}^3$). Реактор помещен в электропечь, конструкция которой обеспечивает резкий перепад температур на месте стыковки малоинерционного высокотемпературного отсека 2 с отсеком 3, имеющим равномерное распределение температуры. Секторы реактора, находящиеся в отсеках 2 и 3, имеют геометрические параметры: $S_2 = 15,9 \text{ см}^2$, $l_2 = 15 \text{ см}$, $V_2 = 239 \text{ см}^3$ и $l_3 = 100 \text{ см}$, $V_3 = 1590 \text{ см}^3$ соответственно. С левого торца реактор (вне электропечи) соединен с коммуникационной трубкой сечением $S_a = 1,5 \text{ см}^2$ ($l_1 = 6 \text{ см}$, $V_1 = 9 \text{ см}^3$ и $T_0 = 300 \text{ К}$).

Для одновременной регистрации температуры в различных секторах реактора использовались подвижные хромель-алюмелевые термомпары (с диаметром проводов 0,2 мм) и цифровые вольтметры Ц-4313. Давление фиксировали датчиком давления, принцип действия которого подробно описан в [5, 6, 13, 14]. Хемилюминесценцию измеряли посредством специально сконструированной системы кварц — световолоконные свето-

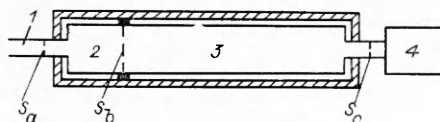


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки.

воды — распределитель — световодов — ФЭУ — усилитель — светолучевой запоминающий осциллограф. При определении пределов воспламенения температуру отсеков 2 и 3 выравняли. В этом случае интенсивность хемилюминесценции пламени регистрировали на осциллографе в виде неразделенного во времени одного пика (от трех световодов). При определении пределов в режиме распространения пламени после напуска в реактор смесь поджигали сначала в высокотемпературном отсеке 2, тогда волна распространялась в зону 3. Интенсивность хемилюминесценции фронта пламени на фиксированных точках стыковки световодов с реактором регистрировали на осциллографе. Скорость распространения определяли по временной разности максимумов пиков хемилюминесценции при заданных режимах развертки осциллографа.

Для расчета характеристик воспламенения смеси водорода с кислородом в неизотермическом реакторе использовали программу «Мартоян-1». Материальный баланс составляли на основании оптимизации полной кинетической схемы окисления водорода [15] с выделением семнадцати стадий, которые в условиях данного эксперимента играют наиболее существенную роль. На каждом шаге расчета по ходу изменения состава, температуры и давления реакционной системы программа самокорректировала входящие в уравнения баланса константы и коэффициенты, а также варьировала шаг расчета. Более подробно о программе и анализе реакционной схемы H_2 с O_2 изложено в [12].

Как указано выше, реакционная смесь во время опытов находится в четырех отличающихся по геометрическим параметрам и по температуре зонах. В подобном неизотермическом реакторе при определении роли процессов тепло- и массопереноса в общем случае необходимо решать пространственно-временную задачу. Однако при определенном соотношении времен транспортировки тепла τ_t , поглощения тепла поверхностью τ_n и химической реакции τ_x можно избежать трудностей пространственно-временной задачи и составить тепловой баланс на основе точечной модели. Для этого необходимо, как это указано в [12], чтобы выполнялось следующее условие:

$$\tau_x > \tau_n > \tau_t. \quad (1)$$

Характерное время вспышки H_2 с O_2 внутри полуострова воспламенения, согласно экспериментальным и расчетным данным, равно примерно 10^{-1} с. Характерное время поглощения тепла поверхностью определяли известной формулой [1]

$$\tau_n = c\rho V/\alpha S,$$

где ρ — плотность газа; c — удельная теплоемкость; V и S — объем и поверхность реактора. При определении коэффициента теплоотдачи α , согласно [1, 8], принято $Nu = 5,44$. Значения теплоемкости смеси определяли по данным [16]. Рассчитанные в соответствующих секторах реактора τ_n имеют следующие значения: $\tau_{n1} \approx 4,8 \cdot 10^{-3}$ с; $\tau_{n2} \approx 10^{-2}$ с; $\tau_{n3} \approx 1,8 \cdot 10^{-2}$ с; $\tau_{n4} \approx 2,5 \cdot 10^{-3}$ с. Характерное время транспорта тепла определяли по формуле [12, 17]:

$$\tau_t = c\rho V^*d/\lambda S,$$

где λ — коэффициент теплопроводности газовой смеси [18, 19]; $V^* = \frac{V_a V_b}{V_a + V_b}$ — приведенный объем для непосредственно контактирующих зон V_a и V_b ; S — сечение; d — характерная длина, на которой температура одной зоны переходит в температуру другой. Нетрудно показать (см. [12, 17, 20]), что $d = \lambda/c\rho\bar{v}$ (\bar{v} — тепловая скорость движения молекул газа).

При определении d исходили из того обстоятельства, что источником тепла для секторов 1 и 3 является горение гремучей смеси во второй зоне, а для сектора 4 — разогрев сектора 3. Расчет показал, что $\tau_{t2} \approx \tau_{t3} \approx 10^{-4}$ с, т. е. во время данных опытов соблюдается условие (1)

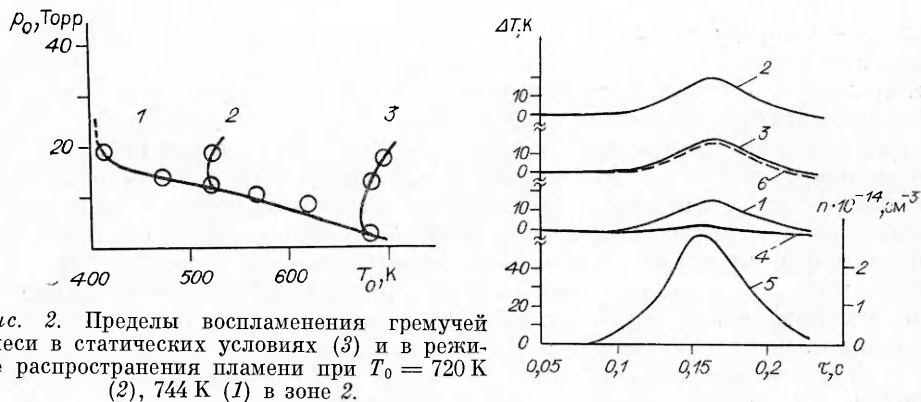


Рис. 2. Пределы воспламенения гремучей смеси в статических условиях (3) и в режиме распространения пламени при $T_0 = 720$ К (2), 744 К (1) в зоне 2.

Рис. 3. Профили температур в соответствующих секторах реактора (1—4) и концентрационный профиль атомов водорода (5) в зоне 2 при $p_0 = 15$ Торр, $T_{01} = T_{04} = 300$ К, $T_{02} = 720$ К, $T_{03} = 530$ К.

6 — профиль температуры в граничном с зоной 2 слое газа толщиной 10^{-2} см.

и для установления характеристик горения можно применять точечную модель. При наличии четырех секций в реакторе модель будет четырехточечной и тепловой баланс горения можно представить системой следующих уравнений:

$$\begin{aligned}
 V_1 c_1 \rho_1 \frac{dT_1}{dt} &= \frac{\lambda_2 S_a}{d_a} (\Delta T_2 - \Delta T_1) - \alpha_1 S_1 \Delta T_1, \\
 V_2 c_2 \rho_2 \frac{dT_2}{dt} &= V_2 \sum_i Q_i W_i - \frac{\lambda_2 S_a}{d_a} (\Delta T_2 - \Delta T_1) - \frac{\lambda_2 S_b}{d_b} (\Delta T_2 - \Delta T_3) - \alpha_2 S_2 \Delta T_2, \\
 V_3 c_3 \rho_3 \frac{dT_3}{dt} &= \frac{\lambda_2 S_b}{d_b} (\Delta T_2 - \Delta T_3) - \frac{\lambda_3 S_c}{d_c} (\Delta T_3 - \Delta T_4) - \alpha_3 S_3 \Delta T_3, \\
 V_4 c_4 \rho_4 \frac{dT_4}{dt} &= \frac{\lambda_3 S_c}{d_c} (\Delta T_3 - \Delta T_4) - \alpha_4 S_4 \Delta T_4.
 \end{aligned} \tag{2}$$

Здесь W_i и Q_i — скорость и тепловой эффект i -й реакции; T_{0j} и T_j — температура стенок и газа в j -м секторе реактора; $\Delta T_j = T_j - T_{0j}$. Решая (2) совместно с уравнениями материального баланса $dn_i/dt = k_i n_i \dots$, можно определить временные профили компонентов и температуры зажигающего пламени водорода с кислородом в секторе 2 неизотермического реактора, а также разогревы в остальных секторах.

Как видно из результатов, представленных на рис. 2, предел воспламенения гремучей смеси в статических условиях значительно отличается от предела в режиме распространения. Из этих же данных следует, что расширение предела существенно зависит от начальной температуры T_{02} газовой смеси в зоне 2. Вне предела наблюдались также и локальные вспышки в секторе 2, которые, однако, не приводили к иницированию волны горения.

Рассчитанные на ЭВМ типичные концентрационно-температурные профили воспламенения горючей смеси в зоне 2, приводящего к распространению пламени, представлены на рис. 3. При пренебрежении фактором неизотермичности и численном эксперименте саморазогрев вспышки достигает 1500 К и более, что указывает на тепловой механизм зажигания и распространения пламени. Между тем, установленные на основе теплового баланса неизотермического реактора по системе (2) разогревы реакционной смеси не превышают 10—20 К. При этом температура газа в соседних секторах повышается незначительно (1—5 К).

Для выяснения механизма зажигания и распространения пламени проводили численные эксперименты по определению разогрева свежей

смеси в граничном с зоной воспламенения слое толщиной 10^{-2} — 10^{-3} см. Как видно из полученных результатов (см. рис. 3), и при этих параметрах температура газа в граничном слое повышается не более 15 К. Отметим также, что время жизни атомов водорода в рассматриваемых условиях (см. рис. 2 и 3) равно 10^{-2} — 10^{-3} с, а время диффузионного выравнивания концентраций атомов водорода в зоне 2 и в граничном с этой зоной слое газа имеет порядок 10^{-5} с. Таким образом, из сопоставления данных по ΔT и τ_n , τ_D следует, что в условиях проведенного эксперимента доминирует в механизме зажигания и распространения пламени диффузия атомов и радикалов в свежую смесь с последующим нелинейным разветвлением цепей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Франк-Каменецкий Д. А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике.— М.: Наука, 1967.
2. Зельдович Я. Б., Баренблатт Г. И., Либрович В. Б. и др. Математическая теория горения и взрыва.— М.: Наука, 1980.
3. Семенов И. И. О некоторых проблемах химической кинетики и реакционной способности.— М.: Изд-во АН СССР, 1958.
4. Воронков В. Г., Семенов И. И. ЖФХ, 1939, 13, 12, 1695.
5. Азатян В. В. Докт. дис.— М., ИХФ АН СССР, 1979.
6. Шавард А. А. Канд. дис.— М., ИХФ АН СССР, 1981.
7. Foo K. K., Yang C. H. Comb. Flame, 1971, 17, 223.
8. Поройкова А. И., Обвивальнева А. В., Азатян В. В. и др. Кинетика и катализ, 1977, 18, 12, 301.
9. Kordylewski W., Scott S. K. Comb. Flame, 1984, 57, 127.
10. Веденеев В. И., Гершензон Ю. М., Поройкова А. И. и др. Кинетика и катализ, 1981, 22, 1, 86.
11. Азатян В. В., Шавард А. А. Хим. физика, 1983, 2, 254.
12. Арутюнян Г. А., Мартоян Г. А., Бейбутян В. М. и др. ФГВ, 1986, 22, 6, 28.
13. Александров Е. И. Канд. дис.— М., ИХФ АН СССР, 1975.
14. Арутюнян Г. А. Канд. дис.— Ереван, ИХФ АН АрмССР, 1980.
15. Кондратьев В. И., Никитин Е. Е. Кинетика и механизм газофазных реакций.— М.: Наука, 1975.
16. Карапетьянц М. Х. Химическая термодинамика.— М.: Химия, 1975.
17. Кикоин И. К., Кикоин А. К. Молекулярная физика.— Ереван: Луйс, 1968.
18. Гиршфельдер Дж., Кертис Г., Бэрд Р. Молекулярная теория газов и жидкостей.— М.: ИЛ, 1961.
19. Warnatz Ba Bunsenges. Phys. Chem., 1978, 82, 2, 193.
20. Эмануэль Н. М., Кнорре Д. Г. Курс химической кинетики.— М.: Выс. шк., 1969.

*Поступила в редакцию 21/III 1986,
после доработки — 14/I 1987*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ В УСЛОВИЯХ ИМПУЛЬСНОГО СЖАТИЯ

*Е. С. Северин, В. Г. Слуцкий
(Москва)*

Требование достаточно быстрого воспламенения топливных смесей при $T \lesssim 1000$ К типично для стадии запуска ряда процессов и агрегатов. Один из методов исследования задержек воспламенения при указанных температурах основан на измерении давления при быстром (импульсном) одноразовом сжатии горючей смеси движущимся поршнем. При этом за задержку воспламенения τ принимается временной интервал между моментом завершения сжатия и началом резкого нарастания давления под поршнем. Подобным методом можно измерять τ в интервале от нескольких до нескольких сотен миллисекунд при давлении до 10 МПа и выше [1, 2]. С методической точки зрения основной момент состоит в определении температуры, при которой происходит воспламенение, поскольку при наличии теплообмена со стенками процесс сжатия неадиабатический. Так, в [3—6] за температуру воспламенения прини-