

ЛИТЕРАТУРА

1. Д. А. Франк-Каменецкий. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М., «Наука», 1967.
2. Л. А. Вулис. Тепловой режим горения. М.—Л., Госэнергоиздат, 1954.
3. H. W. Smith, R. A. Schmitz, R. G. Ladd. Combustion Science and Technology, 1971, 4, 131.
4. Takeo Saito. Int. J. Heat Mass Transfer, 1974, 17, 1063.
5. Тау-И Тунг.—В сб.: Вопросы зажигания и стабилизации пламени. М., ИЛ, 1963.
6. Shinzo Kikkawa, Katsuhiko Yoshikawa. Int. J. Heat Mass Transfer, 1973, 16, 1215.
7. С. М. Тарг. Основные задачи теории ламинарных течений. М.—Л., Гостехиздат, 1951.
8. М. А. Гришин, Е. Е. Зеленский.—В сб.: Численные методы механики сплошной среды. Т. 5, № 4. ВЦ СО АН СССР, 1974.
9. О. Б. Сидонский.—В сб.: Численные методы механики сплошной среды. Т. 3, № 1. ВЦ СО АН СССР, 1972.
10. Я. Б. Зельдович. ЖЭТФ, 1939, 9, 1530.
11. Л. А. Вулис, А. Л. Генкин, Б. А. Фоменко. Теория и расчет магнитогазодинамических течений. М., Атомиздат, 1971.

САМОВОСПЛАМЕНЕНИЕ ТОПЛИВОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В ЗОНАХ ЦИРКУЛЯЦИИ ЗА ПЛОХО ОБТЕКАЕМЫМИ ТЕЛАМИ

М. С. Гордон, А. В. Кудрявцев

Если подать топливо в высокотемпературный поток газа [1, 2], то на некотором расстоянии от места его подачи произойдет самовоспламенение топливовоздушной смеси и появится фронт пламени. Расстояние от места подачи топлива до фронта пламени (длина «холодного» участка) определяется скоростью потока и величиной задержки самовоспламенения, зависящей от параметров потока. Однако если на длине «холодного» участка находится плохо обтекаемое тело, то при определенных условиях горение топлива может начаться раньше, непосредственно за этим телом, вследствие самовоспламенения смеси в зоне циркуляции потока, образовавшейся за этим телом.

Рассмотрим эти условия.

Предположим, что зона циркуляции создана в потоке топливовоздушной смеси. В зоне циркуляции, как показано в [3], состав газа и его температура T_1 практически постоянны по всему объему зоны, поэтому, следуя [4], будем считать, что зона циркуляции представляет собой гомогенный реактор, объем которого равен объему зоны циркуляции.

Кроме того будем считать, что теплообмен между газом, находящимся в зоне, и стенками плохо обтекаемого тела отсутствует и что изменение концентрации реагирующих веществ в зоне вследствие химической реакции пренебрежимо мало, т. е. значения этих концентраций в потоке и зоне циркуляции равны между собой [5]. В этих предположениях можно записать уравнение теплового баланса для зоны циркуляции

$$H_u/C_p \cdot \omega = \varepsilon (T_1 - T) = (T_1 - T)/\tau_0,$$

где H_u — теплотворная способность топлива; C_p — теплоемкость смеси; ω — скорость химической реакции; $\varepsilon = 1/\tau_0$ — коэффициент массообмена между зоной и внешним потоком; τ_0 — характерное время массообмена; T — температура потока.

Принимая, что скорость химической реакции имеет второй порядок по концентрации, и выражая концентрации кислорода и топлива через коэффициент избытка воздуха, находим

$$0,23k_0 \frac{H_u p}{C_p R \sqrt{T_1}} \cdot \frac{(\alpha_0 - 1)(\alpha_0 - \alpha_1) z_0 \alpha_1}{\alpha_0^2 (1 + z_0 \alpha_1)^2} \exp\left(-\frac{E}{RT_1}\right) = \frac{T_1 - T}{\tau_0}.$$

Здесь E — энергия активации, k_0 — предэкспоненциальный множитель, z_0 — стехиометрический коэффициент, R — газовая постоянная, α_0 — коэффициент избытка воздуха в исходном газовом потоке (для воздуха $\alpha_0 = \infty$).

На стационарном режиме, когда выделение тепла в зоне циркуляции мало, величина T_1 близка к температуре потока T . Поэтому введем, следуя [5], безразмерную температуру $\theta = E(T_1 - T)/RT^2$ и заменим $\sqrt{T_1}$ близкой ей величиной \sqrt{T} , тогда получим

$$\omega e^\theta = \theta, \quad (1)$$

где

$$\omega = 0,23k_0 \tau_0 \frac{H_u E p}{C_p R^2 T^{2,5}} \frac{(\alpha_0 - 1)(\alpha_0 - \alpha_1) z_0 \alpha_1}{\alpha_0^2 (1 + z_0 \alpha_1)^2} \exp\left(-\frac{E}{RT}\right). \quad (2)$$

Уравнение (1) имеет решение только при значениях параметра ω , меньших некоторой определенной величины $\omega_{кр}$. При $\omega > \omega_{кр}$ стационарный режим без горения топлива в зоне циркуляции невозможен, т. е. при $\omega > \omega_{кр}$ произойдет самовоспламенение топлива. На границе области самовоспламенения топлива в циркуляционной зоне должно выполняться условие $\omega = \omega_{кр}$. Для нахождения $\omega_{кр}$ воспользуемся, согласно [5], диаграммой Семенова, из которой следует, что на границе области самовоспламенения должны быть равны не только скорости тепловыделения в зоне и теплоотвода из зоны, но и их производные по температуре:

$$\omega e^\theta = \theta,$$

$$\omega e^\theta = 1.$$

Этим условиям удовлетворяют значения $\omega_{кр} = 1/e$ и $\theta_{кр} = 1$.

Характерное время массообмена пропорционально отношению характерного размера тела d к скорости набегающего потока u [3], т. е. $\tau_0 = Cd/u$, поэтому уравнение границы области самовоспламенения топлива в зоне циркуляции за плохо обтекаемым телом, используя (2), можно записать

$$F = \frac{(\alpha_0 - 1)(\alpha_0 - \alpha_1) z_0 \alpha_1}{\alpha_0^2 (1 + z_0 \alpha_1)^2}, \quad (3)$$

где через F обозначено выражение

$$F = 0,435C \cdot u/pd \cdot C_p R^2 T^{2,5} \exp(E/RT - 1)/k_0 E H_u.$$

Экспериментально область самовоспламенения топлива определялась за конусными стабилизаторами пламени с диаметром основания 22, 30 и 43 мм и углом при вершине 30°. Стабилизаторы устанавливались в цилиндрической модели камеры сгорания диаметром 180 мм. Поля температуры и скорости потока в модели были достаточно равномерны. Топливо (керосин) подавалось в модель центробежной форсункой на расстоянии 120 и 650 мм от стабилизатора.

В опытах измерялись температура газа T_0 и коэффициент избытка воздуха α_0 на входе в модель, статическое давление p и скорость потока u в плоскости среза стабилизатора пламени. Значение коэффи-

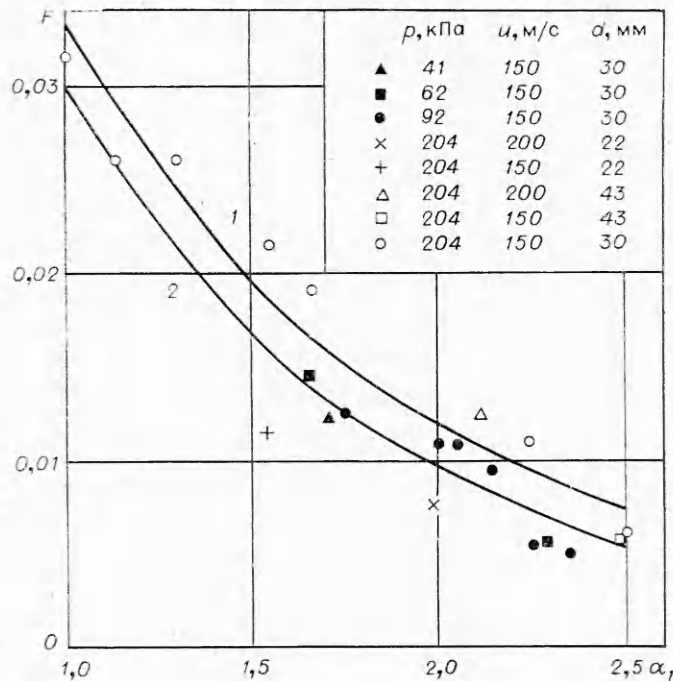


Рис. 1. «Бедная» граница области самовоспламенения топлива в зоне циркуляции (расчет при $\alpha_0=4,0$ (1) и $3,5$ (2)).

циента избытка воздуха в зоне циркуляции α_1 определялось по данным химического анализа проб газа, отобранных из зоны. Все опыты проводились при $u=150$ и 200 м/с и $p=41, 61, 92$ и 204 кПа. За граничные условия самовоспламенения принимались такие значения параметров потока, при которых появлялась единичная вспышка топлива за стабилизатором, наблюдаемая визуально.

Результаты обработки опытов по определению «бедной» границы области самовоспламенения представлены на рис. 1 в виде зависимости $F=f(\alpha_1)$. Поскольку в опытах измерялась температура газа на входе в модель, при обработке опытных данных вводилась поправка на затраты тепла, связанные с испарением и прогревом паров топлива. На рис. 1 нанесена также граница области самовоспламенения, определенная по формуле (3). В расчетах величины C, E, k_0 были выбраны на основании данных, приведенных в [6, 7] ($C=10; E=45000$ кал/моль; $k_0=0,629 \cdot 10^{10}$ м³/(кг·с·К^{0,5})). Из рис. 1 видно, что расчетные кривые достаточно удовлетворительно согласуются с экспериментальными точками.

Кроме границы области самовоспламенения в опытах было определено положение «бедной» границы области устойчивого горения топлива для одного из стабилизаторов пламени ($d=30$ мм) при скорости потока 150 м/с. Топливо в этой серии опытов подавалось в модель на расстоянии 120 мм от стабилизатора пламени. Результаты этих опытов представлены на рис. 2, где приведено также расчетное положение границ областей устойчивого горения и самовоспламенения топлива за стабилизатором пламени. Первая серия кривых рассчитывалась по методике, приведенной в [8], вторая — по формуле (3). Из графика следует, что минимальной температуре, при которой становится возможным самовоспламенение топлива за стабилизатором пламени, соответствует значение коэффициента избытка воздуха, лежащее внутри области устойчивого горения топлива за стабилизатором.

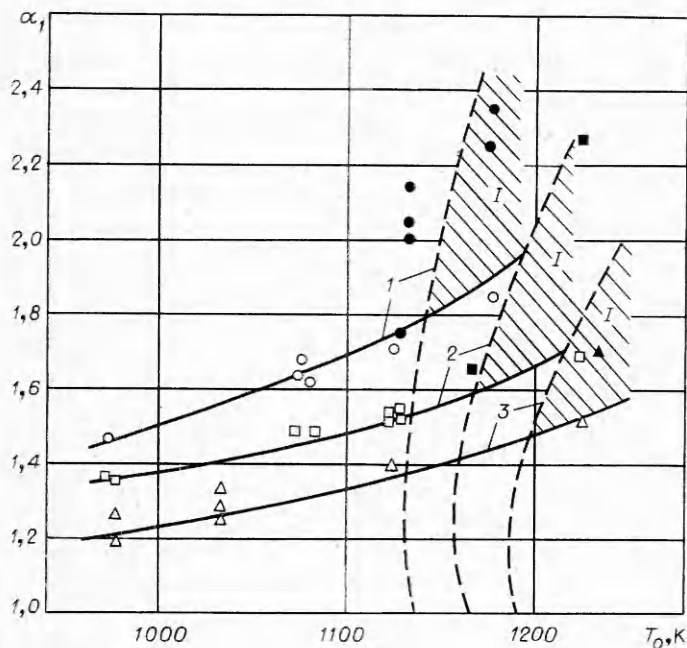


Рис. 2. Область устойчивого горения и воспламенения топлива за стабилизатором $d=30$ мм ($u=150$ м/с).

Светлые точки — срыв пламени со стабилизатора или появление «прерывистого» горения; темные точки — самовоспламенение топлива за стабилизатором; — — — — расчетные границы области устойчивого горения; — — — — расчетные границы области самовоспламенения топлива за стабилизатором; p , кПа: 1 — 92, 2 — 62, 3 — 41; I — область прерывистого горения.

Однако с повышением температуры газа область самовоспламенения расширяется существенно быстрее, чем область устойчивого горения. Это приводит к тому, что, начиная с некоторой температуры газа, область самовоспламенения топлива становится шире области устойчивого горения. Появляется область изменения коэффициента избытка воздуха, лежащая между границами областей самовоспламенения и устойчивого горения, для которой не существует стационарного состояния. В этом случае в опытах было отмечено, что за стабилизатором пламени наблюдается самопроизвольное погасание и воспламенение топлива в зоне циркуляции (прерывистое горение). Для иллюстрации прерывистого горения была проведена киносъемка пламени за стабилизатором (скорость съемки 32 кадр/с) с последующим определением изменения относительной яркости пламени во времени по степени потемнения каждого кадра. На режиме устойчивого горения топлива за стабилизатором величина относительной яркости пламени выбиралась равной единице. В случае, когда горение топлива за стабилизатором отсутствует, $\bar{\Phi}=0$. Результаты этих опытов приведены на рис. 3.

Как следует из графиков, увеличение коэффициента избытка воздуха за стабилизатором при заданных значениях T_0 , u , p приводит к следующему изменению относительной яркости пламени. Если самовоспламенение смеси в зоне циркуляции невозможно или область самовоспламенения уже области устойчивого горения, при подходе к границе области устойчивого горения яркость пламени несколько понижается и при срыве пламени падает до нуля. В дальнейшем горение за стабилизатором самопроизвольно не возобновляется (четкий срыв пламени, см. рис. 3, а).

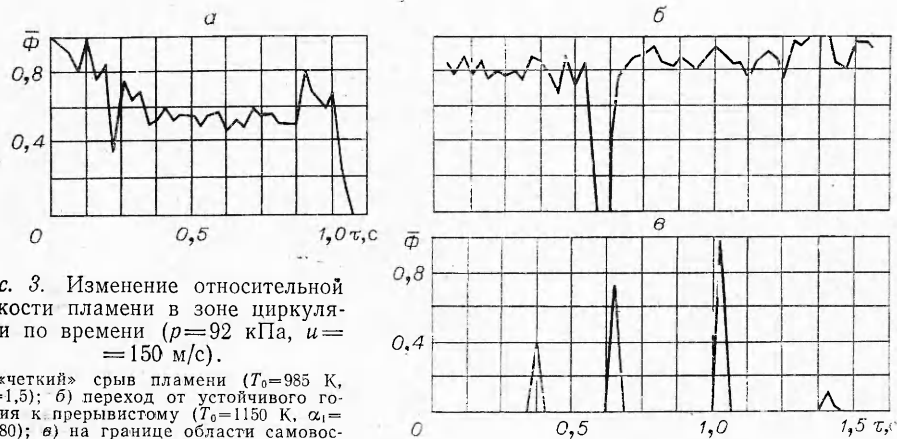


Рис. 3. Изменение относительной яркости пламени в зоне циркуляции по времени ($p=92$ кПа, $u=150$ м/с).

а) «четкий» срыв пламени ($T_0=985$ К, $\alpha_1=1,5$); б) переход от устойчивого горения к прерывистому ($T_0=1150$ К, $\alpha_1=1,80$); в) на границе области самовоспламенения ($T_0=1150$ К, $\alpha_1=2,05$).

В случае, когда область самовоспламенения шире области устойчивого горения, четкий срыв пламени со стабилизатора уже не наблюдается, а прекращение горения происходит следующим образом. Вначале при достижении границы области устойчивого горения появляются отдельные кратковременные погасания пламени за стабилизатором. Характерное изменение яркости пламени на таком режиме показано на рис. 3, б.

Дальнейшее обеднение смеси приводит к увеличению промежутков времени, когда пламя за стабилизатором отсутствует. Наконец, на границе области самовоспламенения горение топлива за стабилизатором практически отсутствует, а наблюдаются лишь отдельные вспышки (см. рис. 3, в).

Таким образом, разработана методика определения границ области самовоспламенения горючей смеси в зоне циркуляции за плохо обтекаемым телом. Расчетные положения границ области достаточно удовлетворительно согласуются с экспериментальными значениями. Экспериментально показано, что внутри области самовоспламенения существует область устойчивого горения топлива. Вне этой области горение неустойчиво. Границы области устойчивого горения, по-видимому, определяются теми же соотношениями, что и вне области самовоспламенения.

Центральный институт
авиационного моторостроения
им. П. И. Баранова

Поступила в редакцию
5/IV 1976

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Р. Mullins. Fuel, 1955, 5, 6, 7.
2. Ю. М. Трушин.—В сб.: Третье всесоюзное совещание по теории горения. Т. 1. М., Изд. АН СССР, 1960.
3. Т. А. Бовина.—В сб.: Горение при пониженных давлениях и некоторые вопросы стабилизации пламени в однородных и двухфазных системах. М., Изд. АН СССР, 1960.
4. I. P. Longwell, M. A. Weiss. Ind. and Eng. Chem., 1955, 47, 8.
5. Д. А. Франк-Каменецкий. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М., «Наука», 1967.
6. А. В. Кудрявцев.—В сб.: Физика горения. Киев, «Наукова думка», 1966.
7. A. W. Quick. D. V. L. Bericht, 1956, 12.
8. Б. П. Лебедев, И. Ю. Доктор.—В сб.: Горение и взрыв. М., «Наука», 1972.