

## ТЕПЛОВОЙ ВЗРЫВ В СЛОЕ С ГРАНИЦАМИ РАЗНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ ПОПЕРЕЧНОМ ДВИЖЕНИИ РЕАГЕНТА

А. К. Колесников

(Пермь)

В теории теплового взрыва большой интерес представляет изучение различных механизмов изменения и особенно увеличения критических значений параметров, определяющих условия возникновения взрыва. В рамках одномерной стационарной теории теплового взрыва известны два механизма повышения взрывного порога: охлаждение части границы зоны реакции [1] и однородный продув реагента [2]. Ниже на примере плоского слоя подвижной реагирующей среды исследуется совместное действие этих механизмов.

Рассматриваемый слой химически активной среды, в которой протекает экзотермическая реакция нулевого порядка, ограничен проницаемыми плоскостями  $z=0$  и  $z=d$ , имеющими абсолютные температуры  $T_0$  и  $T_1$ , причем  $T_0 \geq T_1$ . Через проницаемые границы вдоль оси  $z$  осуществляется однородный поперечный продув реагента со скоростью  $\vec{v}$ . Стационарный перенос тепла в движущейся таким образом химически активной среде при отсутствии свободной конвекции и аррениусовской зависимости скорости реакции от температуры описывается нелинейным одномерным уравнением теплопроводности, которое в безразмерной форме имеет вид [2]

$$\Theta'' - \text{Pe} \Theta' + \text{Fk} \exp[\Theta/(1 + \beta\Theta)] = 0. \quad (1)$$

Здесь  $\Theta$  — температура, отсчитываемая от  $T_0$ ;  $\text{Pe} = vd/\chi$  — число Пекле;  $\text{Fk} = QEd^2k_0 \exp(-E/RT_0)/\kappa RT_0^2$  — параметр Франк-Каменецкого;  $\beta = RT_0/E$  — малый параметр;  $Q$  — тепловой эффект реакции;  $E$  — энергия активации;  $k_0$  — предэкспоненциальный множитель;  $R$  — универсальная газовая постоянная;  $\kappa$  и  $\chi$  — коэффициенты тепло- и температуропроводности; единицами измерения расстояния и температуры служат величины  $d$  и  $RT_0^2/E$ ; штрихом обозначено дифференцирование по  $z$ .

На границах слоя выполняются следующие условия

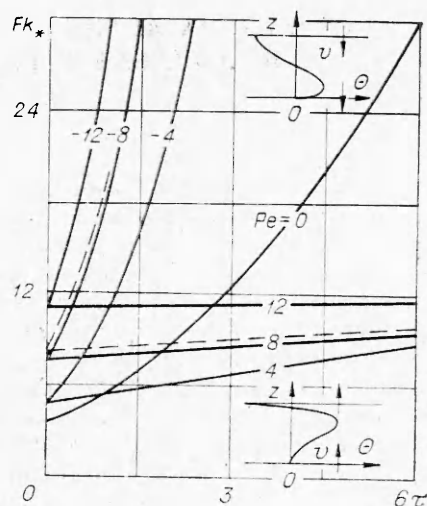
$$\Theta(0) = 0, \quad \Theta(1) = -\tau, \quad (2)$$

где  $\tau = |T_0 - T_1|E/RT_0^2$  — безразмерная разность температур стенок слоя. При  $\text{Pe} = 0$  и  $\tau = 0$  краевая задача (1), (2) сводится к классической задаче Франк-Каменецкого о тепловом взрыве в слое покоящегося реагента, ограниченного плоскостями с одинаковой температурой [3]. В случае  $\tau \neq 0$  и  $\text{Pe} = 0$  она совпадает с рассмотренной в [1] (см. также [4]), где определены условия возникновения теплового взрыва при охлаждении одной из границ слоя. Наконец, при  $\text{Pe} \neq 0$  и  $\tau = 0$  соотношения (1), (2) позволяют найти порог теплового взрыва при однородном поперечном движении реагента в слое с изотермическими границами, что сделано в [2].

В общем случае  $\text{Pe} \neq 0$  и  $\tau \neq 0$  уравнение (1) с крайевыми условиями (2) определяет критические условия возникновения теплового взрыва для слоя, в котором поперечная прокачка реагента осуществляется через границы, имеющие различные температуры. При  $\text{Pe} > 0$  химически активное вещество в зону реакции подается со стороны более нагретой стенки слоя, при  $\text{Pe} < 0$  — со стороны более холодной. Очевидно, что для  $\tau \neq 0$  должна появляться зависимость порога теплового взрыва от направления прокачки реагента, отсутствующая в случае границ с одинаковой температурой.

Как и в перечисленных частных постановках, при наличии охлаждения и продува краевая задача (1), (2) дает два стационарных режима переноса тепла для всех величин параметра Франк-Каменецкого, мень-

ших некоторого значения  $Fk_*$ . Низкотемпературный режим является устойчивым, высокотемпературный — неустойчивым. При  $Fk > Fk_*$  тепловыделение преобладает над теплоотводом и в слое происходит тепловой взрыв. Зависимости пороговых значений  $Fk_*$  от параметров  $Re$ ,  $\tau$  и  $\beta$ , полученные в результате решения методом Рунге-Кутты (1), (2), представлены на рисунке. Сплошные линии соответствуют  $\beta = 0$ , штриховые построены при  $\beta = 0,05$ . Кроме того, на рисунке качественно показан вид стационарных распределений температуры  $\Theta(z)$  в предвзрывной области значений параметров для обоих направлений продува.



Кривая  $Fk_*(\tau)$  при  $Re = 0$  свидетельствует о сильном росте критических значений параметра Франк-Камецецкого в результате охлаждения одной из границ слоя покоящегося реагента. Приведенные на рисунке зависимости  $Fk_*(\tau)$  для  $Re = 4; 8$  и  $12$  имеют даже при значительных  $\tau$  практически линейный характер и показывают, что возникновение одностороннего движения со стороны более нагретой стенки значительно ослабляет воздействие механизма охлаждения на взрывной порог и при интенсивном движении продув полностью компенсирует его влияние. В этом случае определяющим параметром в задаче становится число Пекле. Так, если для покоящегося реагента увеличение параметра  $\tau$  от 0 до 4 приводит к пятикратному росту значений  $Fk_*$ , то при  $Re = 8$  соответствующее изменение составляет 17%, а при  $Re = 12$  — лишь 4%. Заметим, что в слое толщиной 0,01 м для жидких реагирующих веществ таким значениям  $Re$  отвечают весьма умеренные скорости порядка  $10^{-3} - 10^{-4}$  м/с.

При подводе в зону реакции химически активного вещества, имеющего температуру холодной стенки, происходит взаимное усиление эффективности механизмов охлаждения и продува, взрывной порог резко увеличивается. На рисунке такие зависимости  $Fk_*(\tau)$  построены для  $Re = -4; -8; -12$ . На процессы теплопереноса и условия возникновения теплового взрыва в этом случае сильно влияют параметры  $Re$  и  $\tau$ . При  $Re < 0$  даже незначительного охлаждения границы слоя достаточно для многократного увеличения  $Fk_*$ ; например, при  $Re = -4$   $Fk_*(1) \approx 2Fk_*(0)$ , а при  $Re = -12$   $Fk_*(1) \approx 3Fk_*(0)$ .

Учет малого параметра  $\beta$ , значения которого для реальных процессов не превышают 0,05, при любых величинах  $Re$  и  $\tau$  приводит к небольшому увеличению значений  $Fk_*$  (штриховые кривые на рисунке для  $Re = -8; 8$ ).

Полученные результаты свидетельствуют о сильном влиянии механизмов охлаждения границы зоны реакции и продува реагента на стационарные тепловые процессы в химически активных средах. Совместное действие этих механизмов может, в частности, служить эффективным средством изменения критических условий возникновения теплового взрыва в весьма широких пределах.

Поступила в редакцию 17/II 1983, после доработки — 23/VIII 1983

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Я. Б. Зельдович. ЖЭТФ, 1939, 9, 2, 1530.
2. Е. А. Еремин, А. К. Колесников. ФГВ, 1978, 14, 5, 131.
3. Д. А. Франк-Камецецкий. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М.: Наука, 1967.
4. А. К. Колесников, А. П. Ташлыкков. — В кн.: Конвективные течения. Вып. 1. Пермь, 1979.