

ЯВЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ЭНЕРГИИ В ВОЛНАХ ГОРЕНИЯ

В. С. Бабкин, И. Вежба*, Г. А. Карим*

Институт химической кинетики и горения СО РАН, 630090 Новосибирск, babkin@ns.kinetics.nsc.ru

*Университет Калгари, Калгари, Канада

На примере природных пламен с избытком энергии показано, что эти пламена могут существовать в разнообразных системах и режимах горения. Само существование некоторых пламен, таких как ячеистые и спиновые, обусловлено избыточной энергией. Многообразны и механизмы концентрации энергии. Кроме теплообменных процессов — кондукции, конвекции, излучения — концентрация энергии может быть обусловлена массообменными процессами, фазовыми переходами, фильтрацией, сжимаемостью газа и др. Приведенные примеры пламен с искусственно создаваемыми условиями для концентрации энергии демонстрируют широкий спектр возможных приложений этого явления.

ВВЕДЕНИЕ

Управление процессами горения обычно основано на вариации химических или физических параметров. В первом случае — это параметры реагирующей смеси (состав смеси, параметры химической реакции, скорость горения и т. д.), во втором — параметры, контролируемые тепловые, аэродинамические и другие физические характеристики горения. Эти традиционные способы хорошо известны и в значительной степени ограничены. В этой связи представляют интерес нетрадиционные методы управления, использующие свойства пламен к самоорганизации, в частности явление концентрации энергии в волнах горения, известное в литературе под термином «избыток энтальпии». Проблеме горения с избытком энтальпии или энергии посвящено большое число работ, включая обзоры, касающиеся в основном горелочных устройств [1, 2]. Однако явление избытка энергии, как отмечено в работе [3], более распространено в природе, чем считалось ранее. Есть необходимость дальнейшего анализа процессов горения с избытком энергии с целью поиска общих закономерностей и развития физико-химических основ различных приложений.

В настоящей работе анализируются некоторые аспекты проблемы пламен с избытком

энергии: в каких системах, каким путем, с вовлечением каких элементарных процессов происходит формирование таких пламен и каковы перспективы использования принципов и свойств этих пламен на практике (в горелках, реакторах, технологиях).

ПЛАМЕНА С ИЗБЫТКОМ ЭНЕРГИИ

Ячеистые пламена. Ранние представления о явлении концентрации энергии в пламенах, по видимому, относятся к 30-м годам. Б. Льюис и Г. фон Эльбе [4], анализируя соотношение химической и тепловой частей энергии в общей энтальпии горючей смеси, пришли к заключению о существовании «избытка энтальпии» в зоне пламени в том случае, когда коэффициент температуропроводности смеси (χ) превышает коэффициент диффузии недостающего компонента (D). Этот вывод был сделан для плоских ламинарных пламен. Затем было установлено, что концентрация энергии наблюдается в искривленных пламенах, но механизм образования избытка энергии в этом случае оказался отличным от механизма в плоских пламенах [5, 6]. Такой случай реализуется, например, в очень бедных водородовоздушных пламенах. Здесь число Льюиса $Le = \chi/D < 1$ и на выпуклых (в сторону свежей смеси) участках фронта пламени имеются более благоприятные условия для поступления водорода в зону химической реакции по сравнению с вогнутыми участками фронта. В результате на выпуклых участках фронта концентрация водорода в зоне пламени выше, чем ее средний уровень в смеси,

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 00-03-32417) и Комиссии ЕС в рамках программ INTAS (грант 96-1173) и INCO-Copernicus-2 (контракт ICA2-СТ-2000-10038).

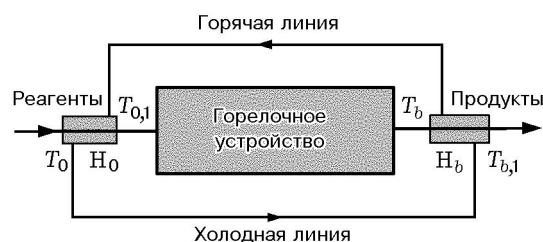


Рис. 1. Горелочное устройство с внешней рекуперацией тепла:

H_0 , H_b — теплообменники

и соответственно выше температура пламени. По этой причине бедные водородовоздушные пламена распространяются в форме отдельных очагов горения при термодинамической температуре горения исходной смеси ≈ 700 К. При такой низкой температуре плоские водородные пламена не могут распространяться.

Регенеративные горелки. Метод использования тепла продуктов горения для повышения энергии горючей смеси и улучшения характеристик горелочных устройств известен давно. При этом обычно используются один или два внешних теплообменника (рис. 1). В результате температура продуктов снижается ($T_{b,1} < T_b$), а температура реагентов повышается ($T_{0,1} > T_0$). Это ведет к увеличению скорости горения и эффективности горелочного устройства. Такая простая идея оказалась очень эффективной, и ее воплощение в практику имело многочисленные модификации [7, 8].

Так, в 80-х годах получил распространение метод реверс-регенератора, разработанный компанией «Бритиш Газ» для тяжелой индустрии (плавка металлического лома, стекла и др.) [9]. Плавильная печь с системой теплообменников снабжена двумя газовыми горелками, работающими попеременно (рис. 2). Сначала зажигается горелка C_1 , продукты горения проходят через горелку C_2 , теплообменник H_2 (контейнер с керамической пористой средой) и в охлажденном состоянии поступают на выброс. После «зарядки» теплообменника H_2 теплом газовый поток в печи изменяет направление движения на противоположное. Зажигается горелка C_2 , продукты горения проходят через горелку C_1 , теплообменник H_1 , аналогичный теплообменнику H_2 , и в охлажденном состоянии поступают на выброс. По данным «Бритиш Газ» такая система позволяет утилизировать 90 % тепла отходящих газов и дает

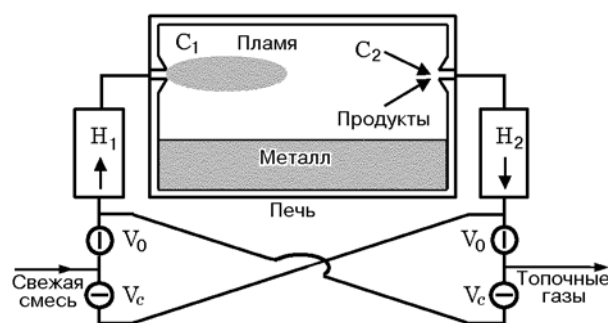


Рис. 2. Плавильная печь с регенеративными горелками:

C_1 , C_2 — горелки; H_1 , H_2 — теплообменники, V_0 , V_c — вентили в открытом и закрытом положениях

большую экономию топлива.

В более компактной форме идея рециркуляции тепла с внешним теплообменником реализована в системе «двойная спираль» или «рулет», предложенной в [10]. Здесь теплообменники на входе и выходе горелочного устройства совмещены в одном (рис. 3).

Туннельная горелка. Принцип избытка энергии реализуется также в условиях туннельной горелки [11], для которой характерны два конструктивных элемента. Во-первых, горелка выполнена в виде туннеля, стенки которого выложены жаростойким материалом (керамикой), и, во-вторых, геометрия горелки такова, что в области стабилизации пламени (у корня факела) имеется зона рециркуляции продуктов горения (рис. 4), в результате чего к струе свежей смеси подсасываются горячие продукты. Происходит устойчивое воспламенение смеси, локальное увеличение скорости горения и, в ко-



Рис. 3. Регенеративная горелка с двойной спиралью

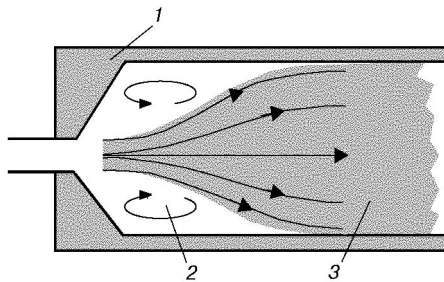


Рис. 4. Схема туннельной горелки:

1 — керамика, 2 — циркулируя продукты, 3 — продукты горения

нечном счете, улучшение срывных характеристик горелки. Замечено, что в короткой камере сгорания, вследствие подсоса, в зону рециркуляции попадает холодный газ из окружающего пространства и горение срывается. Этот факт свидетельствует о важной роли горячих продуктов сгорания. Функция керамической облицовки при этом состоит в поддержании высокой температуры смеси и продуктов горения в области обратных токов. Высокая температура стенки камеры обеспечивается всеми составляющими сложного теплообмена: кондукцией, конвекцией и радиацией. Отметим, что высокая эффективность туннельной горелки связана, прежде всего, с ее высокими стабилизационными характеристиками. Таким образом, в туннельной горелке содержатся элементы совмещения процессов рекуперации тепла и горения. Однако это совмещение носит локальный характер (в области обратных токов) и не влияет непосредственно на основную зону горения. В полной форме внутренняя рекуперация тепла проявляется при горении в пористой среде.

Стабилизированное горение в пористой среде. В [12] теоретически рассмотрено явление концентрации энергии при горении перемешанной газовой смеси в полуограниченной инертной пористой среде. Поскольку рассматривались стабилизированные пламена (неподвижные относительно пористой среды), равновесная температура (T_{eq}) была равна адиабатической температуре обычных (т. е. без пористой среды) газовых пламен (T_b). В работе показано, что в зоне химической реакции существует пик неравновесной температуры, существенно превышающей адиабатическую температуру пламени (рис. 5). Пик температуры обусловлен внутренней рекуперацией тепла в зоне пламени. Часть тепла продуктов горения пе-

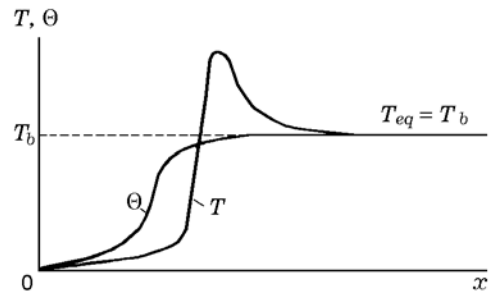


Рис. 5. Тепловая структура стабилизированной волны горения

редается посредством кондукции по твердому каркасу в зону подогрева. В результате кондуктивной рекуперации в зоне подогрева температура каркаса Θ оказывается больше температуры газа T (см. рис. 5). Поэтому до начала воспламенения горючая смесь дополнительно подогревается, в результате чего в зоне химической реакции образуется пик сверхадиабатической температуры. Этот результат явился теоретическим обоснованием возможности сжигания низкокалорийных, «запредельных» в обычных условиях газовых смесей. Выводы работы [12] были подтверждены в дальнейших экспериментальных и теоретических исследованиях [13–15].

Бегущие волны горения в пористой среде. Принципиально иная ситуация с внутренней рекуперацией тепла возникает при движении волны горения в инертной пористой среде в режиме низких скоростей [16–18]. В этом случае равновесная температура горения не равна адиабатической температуре обычного пламени. При стационарном распространении волны выражение для равновесной температуры имеет вид [17]

$$T_{eq} = T_0 + (Q/C_T)(v - u)/(v - (1 - \sigma)u),$$

$$\sigma = (1 - m)(C_\Theta \rho_\Theta / m C_T \rho_T),$$

где T_0 — начальная температура; u, v — скорости тепловой волны и фильтрации свежего газа; Q — тепловой эффект реакции; C_T, C_Θ — теплоемкости газа и твердой фазы; ρ_T, ρ_Θ — плотности газовой и твердой фаз; m — пористость. Из формулы следует, что при $u > 0$ равновесная температура выше адиабатической: $T_{eq} > T_b = T_0 + Q/C_T$ (рис. 6). Если рассматривать процесс горения в системе координат,