

## 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 ( $\chi$ ) 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).

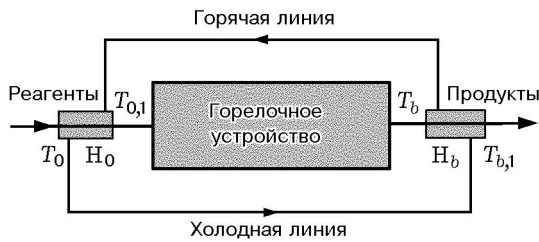


Рис. 1. Горелочное устройство с внешней рекуперацией тепла:

$H_0, H_b$  — теплообменники

и соответственно выше температура пламени. По этой причине бедные водородовоздушные пламена распространяются в форме отдельных очагов горения при термодинамической температуре горения исходной смеси  $\approx 700$  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

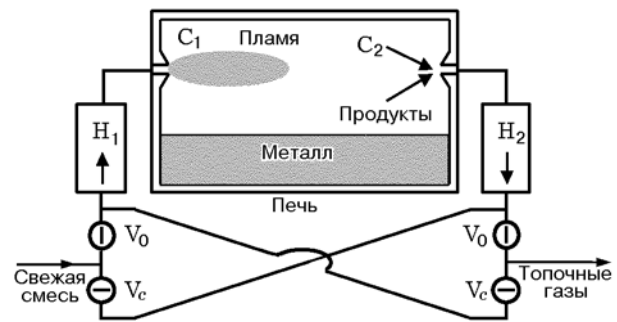


Рис. 2. Плавильная печь с регенеративными горелками:

$C_1, C_2$  — горелки;  $H_1, H_2$  — теплообменники,  $V_0, V_c$  — вентиляторы 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

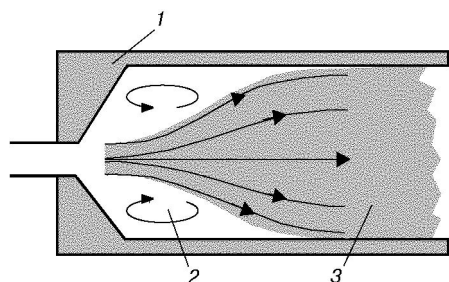


Рис. 4. Схема туннельной горелки:

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-

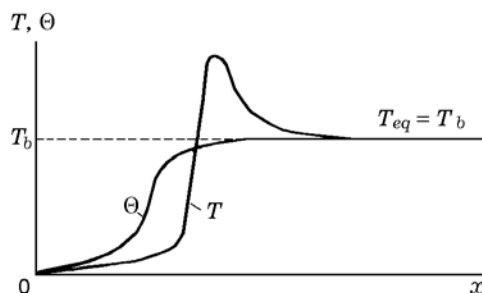


Рис. 5. Тепловая структура стабилизированной волны горения

редается посредством кондукции по твердому каркасу в зону подогрева. В результате кондуктивной рекуперации в зоне подогрева температура каркаса  $\Theta$  оказывается больше температуры газа  $T$  (см. рис. 5). Поэтому до начала воспламенения горючая смесь дополнительно подогрывается, 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;  $C_T, C_\Theta$  — теплоемкости газа и твердой фазы;  $\rho_T, \rho_\Theta$  — 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,

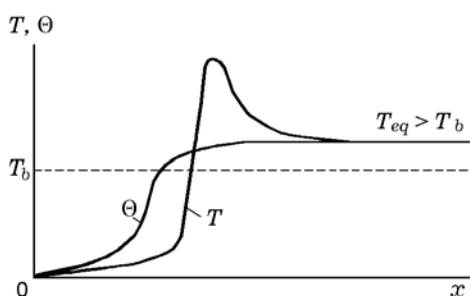


Рис. 6. Тепловая структура спутной волны горения

движущейся вместе с зоной химической реакции, то можно видеть, что горячая пористая среда из области продуктов горения движется в область свежей смеси, проходя зону химической реакции. Вместе с пористой средой в зону подогрева конвекцией эффективно переносится тепло. Здесь оно переходит в газовую фазу, увеличивая ее температуру. Важно, что именно конвективная рекуперация тепла позволяет увеличить равновесную температуру, поднять потенциал утилизируемого тепла. Заметим, что в спутной бегущей волне горения кондуктивная рекуперация, приводящая к сверхадиабатической неравновесной температуре в зоне химической реакции, сохраняется. Однако дополнительно появляется сверхадиабатическая равновесная температура, обусловленная конвективной рекуперацией тепла. Другими словами, спутные бегущие волны имеют существенно новое свойство, отсутствующее в стабилизированных пламенах, — сверхадиабатическую равновесную температуру.

**Реверс-процесс с газофазной реакцией.** Явление сверхадиабатической равновесной температуры, описанное в предыдущем пункте, первоначально было обнаружено в пористых системах в волнах химического превращения с гетерогенной реакцией [19–21]. В дальнейшем это свойство пламен с избытком энергии было использовано в практической системе «реверс-процесс» [22], схема которого приведена на рис. 7. Реактор представляет собой симметричную относительно входа и выхода конструкцию, в центре которой находится пористый слой катализатора. С обеих сторон катализатора размещены слои инертной пористой среды, играющие роль теплообменников. Схема управления газовыми потоками такова, что позволяет переключением вентиля периодически изменять направление движения газа

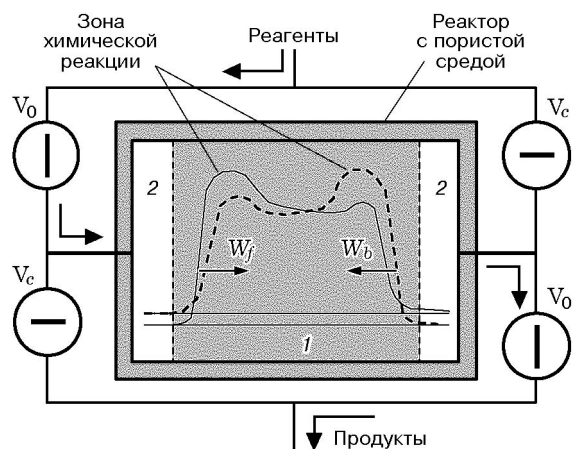


Рис. 7. Схема реверс-процесса:

1 — слой пористого катализатора, 2 — слой инертной пористой среды,  $W_f$ ,  $W_b$  — волны, движущиеся в прямом и обратном направлениях;  $V_0$ ,  $V_c$  — вентили в открытом и закрытом положениях

в реакторе. После инициирования волны химического превращения в слое катализатора она в форме П-образного импульса движется в направлении газового потока ( $W_f$ ). При этом химическая реакция локализована не на переднем фронте волны (фронт нагрева), а на заднем (фронт охлаждения). Спустя полпериода работы реактора направление потока реакционной смеси изменяется и волна движется в обратном направлении ( $W_b$ ). Причем химическая реакция локализована, как и раньше, на заднем фронте П-образной волны.

Исследования волн горения в инертных пористых средах, проведенные в начале 80-х годов, показали принципиальную возможность осуществления реверс-процесса с газофазной реакцией в режиме низких скоростей [16, 17]. Действительно, уравнения баланса тепла, описывающие тепловую структуру газофазных и каталитических бегущих волн в режиме низких скоростей, одинаковы в случае мелкодисперсных пористых сред. Это означает, что явление избытка энергии и сверхадиабатическая равновесная температура, описанные в предыдущем пункте, имеют универсальный характер, т. е. не зависят от типа химической реакции. Реверс-процесс с газофазной реакцией был осуществлен в реакторе, выполненном из кварцевой трубки длиной 500 мм и диаметром 40 мм, заполненной фракцией карборунда  $2 \div 2,5$  мм в режиме низких скоростей [23]. Было показано, что в реверсивной системе в условиях сильных теплопотерь может устойчиво го-

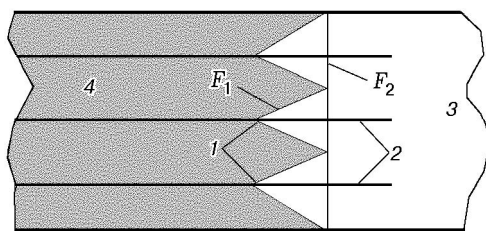


Рис. 8. Схема, иллюстрирующая влияние теплопроводящих элементов (ТЭ) на скорость сгорания энергетического материала:

$F_1$ ,  $F_2$  — площадь горящей поверхности образца при наличии ТЭ и без ТЭ соответственно; 1 — горячие точки, 2 — ТЭ, 3 — продукты сгорания, 4 — исходный энергетический материал

реть «запредельная» пропановоздушная смесь, содержащая 1,7 %  $C_3H_8$ . Вместе с тем были обнаружены проблемные аспекты осуществления реверс-процесса, обусловленные возможностью распада П-образной тепловой волны на две отдельные волны, образованием асимметричных относительно центра реактора волн, влиянием гравитационной конвекции и пространственной неустойчивостью фронта горения. Недавно появились новые данные о возможности сжигания газовых смесей посредством реверс-процесса с газофазной реакцией с экстремально низким коэффициентом избытка топлива  $\varphi = 0,026$  и с получением низких выбросов  $NO_x$  и  $CO$  (порядка единиц ppm) [24].

**Горение с теплопроводящими элементами.** В 60-х годах внимание исследователей привлекло явление ускоренного сгорания образцов твердых энергетических материалов (типа порохов) при введении в образцы некоторых металлов в виде тонких проволочек, получивших название «теплопроводящие элементы» (ТЭ) [25, 26]. ТЭ, дающие наибольший эффект ускорения сгорания, имеют высокую температуропроводность, и их доля в массе энергетического материала оптимальна. Исследования показали, что механизм ускоренного горения связан с увеличением площади поверхности горения при наличии ТЭ по отношению к площади горения без ТЭ (рис. 8). Увеличение поверхности горения происходит за счет образования лидирующих горячих точек, расположенных вблизи ТЭ. Горячие точки, в свою очередь, образовались за счет эффективной кондуктивной передачи тепла по ТЭ из области продуктов сгорания в область исходного энергетического материала. ТЭ, таким образом, ускоряют

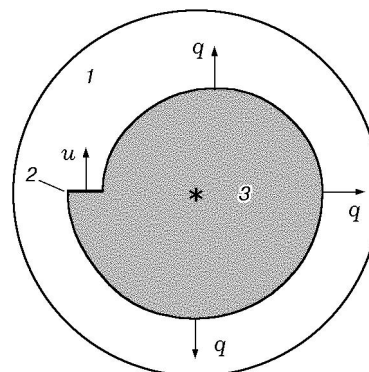


Рис. 9. Спиральное распространение очага горения при центральном воспламенении образца термита:

1 — исходное вещество, 2 — очаг горения, 3 — твердофазные продукты горения,  $q$  — тепловой поток от продуктов горения

прогрев, зажигание и сгорание локальных объемов энергетического материала, расположенного вблизи ТЭ. При этом основная масса топлива не прогревается ТЭ. Интересно, что внутренняя рекуперация тепла обусловлена в данном случае свойствами металлических проволочек и энергетического материала. Она носит локальный характер, а ее следствием является увеличение общей массовой скорости горения.

**Спиральное горение.** Необычное безгазовое горение с избытком энергии наблюдали в работе [27]. Образец, изготовленный в виде таблетки из железциркониевого термита, разбавленного продуктами реакции, поджигался в центре таблетки. Вместо обычного в таких случаях центрально-симметричного радиального распространения волны горения наблюдалось тангенциальное распространение локального очага химической реакции (рис. 9). Очаг распространялся по спирали с увеличивающимся диаметром траектории движения. По мере увеличения диаметра спирали радиальная скорость очага горения уменьшалась. По достижении определенного диаметра сгоревшей части в области свежей термитной смеси, возникал второй, третий и т. д. очаги горения. Направление движения очагов становилось произвольным: оно могло быть, как спутным, так и встречным. В дальнейшем этот нестационарный спиральный режим был назван спиральным режимом горения и исследован теоретически [28].

Механизм спирального горения, по видимому, связан с явлением гасящего

расстояния. Применительно к рассматриваемому случаю это означает, что в таблетке толщиной  $h$  меньше некоторой критической  $h_{cr}$  невозможно радиальное распространение кругового фронта горения. Режим спирального горения имеет место именно в этом случае, т. е. при  $h < h_{cr}$ . Спиральное распространение происходит потому, что за время одного оборота очага горения, исходное вещество, прилегающие к горячим продуктам горения, кондуктивно прогревается от продуктов горения ( $q$ ). В термите образуется избыток энергии, достаточный для тангенциального распространения очага горения. Интересно, что в данном случае рекуперация тепла происходит без относительного движения реагентов и продуктов, как в случае «рулета» (см. рис. 3), но в пассивной фазе ожидания «прибытия» очага горения, движущегося вдоль границы их контакта. Существование некоторых других режимов спиновое горения также связано с концентрацией энергии в волне горения [29].

**Горение с продольными автоколебаниями.** Весьма интересная форма внутренней рекуперации тепла имеет место при горении безгазовых составов с продольными автоколебаниями скорости [30]. При некоторых значениях параметров стационарная волна горения может потерять устойчивость и перейти в продольно-колебательный режим распространения. В данном случае колеблется скорость и структурные характеристики плоской волны горения. Стадия медленного горения (депрессия) постепенно сменяется стадией быстрого горения, последняя переходит в стадию медленного горения, и далее процесс повторяется.

Физически явление периодического распространения обусловлено «накачкой» исходного вещества тепловой энергией, поступающей от горячих продуктов горения за пределом устойчивости режима стационарного распространения. Эта «накачка», происходящая в фазе депрессии, т. е. при низкой скорости волны, приводит к тому, что на последующей стадии быстрого горения максимальная температура превышает адиабатическую в  $1,5 \div 1,8$  раза. По мере сгорания перегретого вещества скорость горения падает, снижается температура горения и наступает фаза депрессии. Далее процесс повторяется.

**Режим звуковых скоростей.** Концентрация энергии в волне горения может также про-

исходить за счет сжимаемости газа. Это наблюдается, в частности, при горении перемешанной смеси в системах с большим гидравлическим сопротивлением, например в инертных пористых средах в режиме звуковых скоростей (скорости волны порядка  $10^2$  м/с) [18]. В этом случае из-за сопротивления расширяющимся продуктам горения в зоне горения образуется волна сжатия с повышенными значениями параметров состояния. В результате создаются более благоприятные условия протекания химической реакции, чем в исходной смеси. Увеличиваются скорость химической реакции, нормальная скорость пламени и скорость распространения волны горения. Отметим, что волна сжатия формируется и поддерживается самим процессом горения, а причиной быстрого горения является загроможденность пространства. Формально эффект описывается коэффициентом сопротивления среды, блокадным отношением (в случае периодических препятствий) или другими параметрами, характеризующими трение движущегося газа. Характерной особенностью волны горения является барическая волна с плавным подъемом давления во фронте, низким (по сравнению с детонационной волной) значением максимального давления и неоднородным пространственно-временным распределением тепловыделения. Волна стационарна, ее скорость зависит от структурных параметров пористой среды и теплофизических характеристик горючего газа [31].

Интересно отметить, что к классу пламен с избытком энергии могут быть отнесены также волны горения в таких процессах, как горение газа при постоянном объеме, переход горения в детонацию, нормальная детонация (детонация Зельдовича — Неймана — Дёринга), в которых концентрация энергии происходит за счет сжимаемости газа.

## ОБСУЖДЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Приведенные примеры пламен с избытком энергии показывают, что концентрация энергии в волнах горения — широко распространенное явление в процессах горения. Оно встречается, по-видимому, во всех системах, где вообще возможно горение: в гомогенных и гетерогенных, газовых и безгазовых, многофазных, дисперсных и пр.

Разнообразны режимы, пламена и процессы горения, в которых осуществляется избы-

ток энергии. Это ламинарные и турбулентные пламена, стабилизированное горение, бегущие волны, диффузионные пламена [32]. Интересно, что само явление «избыток энергии» ответственно за появление «экзотических пламен», таких как ячеистые пламена, спиновые и пульсирующие волны. При фильтрационном горении благодаря избытку энергии пламена имеют уникальные свойства: неравновесную и равновесную сверхадиабатические температуры, возможность распространения по каналам с характерными размерами меньше критических и др.

Многообразны и механизмы образования избытка энергии. Прежде всего, следует отметить две формы рекуперации тепла — внутреннюю и внешнюю, создающие эффект избытка энергии. При внутренней рекуперации этот процесс становится неотъемлемым свойством самого пламени. С практической точки зрения этот тип рекуперации представляется как более эффективный. В обоих случаях важную роль играют все составляющие сложного теплообмена — кондукция, конвекция, излучение. Кроме теплообменных процессов в концентрации энергии могут участвовать массообменные процессы, например селективная диффузия (эффекты числа Льюиса). В этом отношении интересны конкретные механизмы возврата части тепла к свежей смеси от продуктов горения при стабилизации пламени туннельной горелки. В одном из них это достигается смешением продуктов с исходной смесью в области циркуляции газов, в другом случае — путем прогрева керамической облицовки у корня факела, в основном излучением как от самого факела, так и от раскаленных стенок задней части горелки. В обоих случаях возврат тепла способствует стабилизации воспламенения и горения газа. Однако концентрация энергии происходит только во втором случае. Положительный эффект в первом случае обусловлен повышением локального стационарного значения температуры, реагирующей смеси при одновременном разбавлении ее продуктами горения.

Кроме указанных тепло- и массообменных процессов в концентрации энергии могут принимать участие и другие процессы — сжимаемость газа (эффекты числа Маха), массовые силы (эффекты числа Рэлея), фазовые переходы, фильтрация газа и жидкости. Эффекты избытка энергии, таким образом, могут прояв-

ляться через изменение температуры, состава смеси, плотности или давления, через изменение как тепловой, так и химической частей энтальпии.

С другой стороны, повышение реакционной способности смеси в результате концентрации энергии может происходить как по всему фронту пламени, так и локально, в отдельных очагах, ячейках и т. д. Так, повышение температуры и, как следствие, скорости горения энергетического материала в лидирующих точках (вблизи теплопроводящих элементов) приводит тем не менее к глобальному увеличению скорости сгорания всего энергетического материала. Интересно, что особенно ярко свойства избытка энергии проявляются в критических условиях: вблизи пределов распространения пламени, на границах стабилизации, устойчивости и т. д. Другой важный аспект этого явления состоит в том, что дополнительное тепло, поступающее от продуктов горения, может тратиться не только на подогрев реакционной смеси, но и на другие процессы, такие как испарение, газификация и образование горючей смеси над поверхностью жидкого топлива [32]. Важно отметить, что для максимальной концентрации энергии, как правило, требуются оптимальные условия. Поиск этих условий представляет отдельную задачу. От ее решения зависит эффективность приложений пламен с избытком энергии.

Хотя понятие «избыток энтальпии» в пламенах используется часто и его общефизический смысл достаточно ясен, это понятие многоаспектно и нуждается в физико-химической и математической детализации. Например, понятие «сверхадиабатика», используемое для характеристики режимов с аномально высокой температурой в волнах фильтрационного горения, имеет принципиально разное содержание в случаях стабилизированных и бегущих волн. В общем, понятие «избыток энергии» можно определить как некоторую дополнительную энергию, аккумулирующуюся перед фронтом пламени в процессе горения из внутренних или внешних источников.

С другой стороны, пламена с избытком энергии демонстрируют свойства, присущие только этому типу пламен: аномально высокие скорости горения, аномально широкие области существования, экзотические структуры фронтов и др. Теория пламен с избытком энергии пока недостаточно развита и не дает от-

вета на многие вопросы, касающиеся структуры, устойчивости, максимально возможных степеней расширения пределов распространения, срывных характеристик этих пламен. Такие пламена с избытком энергии, как ячеистые и спиновые с принципиально трехмерными структурами зон горения, — следствие сильно нелинейных явлений и требуют адекватных методов анализа. Другими словами, свойства, особенности, условия существования и другие характеристики пламен с избытком энергии должны быть предметом специальных исследований.

Из приведенных выше примеров можно сделать вывод о широком спектре возможных приложений пламен с избытком энергии. Необычные свойства и закономерности таких пламен весьма привлекательны при использовании их в горелочных устройствах, работающих как источники тепла, как сжигатели вредных и ядовитых веществ и как химические реакторы [33]. Широкие возможности открываются, в частности, благодаря отсутствию в пламенах с избытком энергии традиционной для обычных пламен связи между составом горючей смеси и температурой пламени. Это свойство особенно важно в проблеме пожаровзрывобезопасности, поскольку температура пламени и пределы распространения играют здесь важную роль. Многообразие механизмов реализации пламен с избытком энергии предопределяет большое разнообразие приложений, работающих на принципах этих пламен. Приведенные примеры горелочных систем подтверждают эту точку зрения.

Таким образом, пламена с избытком энергии широко распространены в природе, но изучены мало. Дальнейшее накопление и анализ данных по пламенам с избытком энергии будут способствовать их классификации, развитию общепринятых представлений об этом интересном явлении. Дальнейшее целенаправленное изучение свойств и закономерностей, включая скоростные характеристики, пределы и механизмы распространения будут способствовать не только развитию теории этих пламен, но и созданию и развитию эффективных нетрадиционных конвертеров химической энергии, реакторов и технологий различного назначения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Masters J., Webb R. J.** The development of a recuperative burner for gas-fired furnaces // *Proc. Roy. Soc. Lond.* 1984. V. 393. P. 19–49.
2. **Weinberg F. J.** Combustion in heat-recirculating burners // *Advanced Combustion Methods*. Academic Press, 1986. P. 183–236.
3. **Weinberg F.** A brief survey of «excess enthalpy» combustion and some recent developments // 1st Intern. School-Seminar "Modern Problems of Combustion and Its Applications". Minsk, 1995.
4. **Lewis B. and von Elbe G.** On the theory of flame propagation // *J. Chem. Phys.* 1934. V. 2. P. 537.
5. **Зельдович Я. Б.** Теория горения и детонации газов. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1944.
6. **Математические течения горения и взрыва / Я. Б. Зельдович, Г. И. Баренблатт, В. Б. Либрович, Г. М. Махвиладзе.** М.: Наука, 1980.
7. **Throng M. W.** The Science of Flames and Furnaces. Second Ed. London and Beccles: William Clowes and Sons Ltd., 1962.
8. **Jones A. R., Lloyd S. A., Weinberg F. J.** Combustion in heat exchangers // *Proc. Roy. Soc.* 1978. V. A.360. P. 97–115.
9. **Regeneration for Industry** // *R&D Digest*, British Gas, 1985/86. Issue, N 8. P. 16–17.
10. **Lloyd S. A., Weinberg F. J.** A burner for mixtures of very low heat content // *Nature*. 1974. N 251. P. 47–49.
11. **Михеев В. П., Медников Ю. П.** Сжигание природного газа. Л.: Недра, 1975.
12. **Takeno T., Sato K.** An excess enthalpy flame theory // *Combust. Sci. Technol.* 1979. V. 20. P. 73–84.
13. **Deshaiies B., Joulin G.** Asymptotic study of an excess-enthalpy flames // *Combust. Sci. Technol.* 1980. V. 22. P. 281–285.
14. **Takeno T., Sato K., Hase K.** A theoretical study on an excess enthalpy flame // 18th Symp. (Intern.) on Combustion. Pittsburgh: The Combustion Inst., 1981. P. 465–472.
15. **Kotani Y., Takeno T.** An experimental study on stability and combustion characteristics of an excess enthalpy flame // 19th Symp. (Intern.) on Combustion. Pittsburgh: The Combustion Inst., 1982. P. 1503–1509.
16. **Бабкин В. С., Дробышев В. И., Лаевский Ю. М., Потытняков С. И.** О механизме распространения волны горения в пористой среде при фильтрации газа // *Докл. АН СССР*. 1982. Т. 265, № 5. С. 1157–1161.
17. **Бабкин В. С., Лаевский Ю. М.** Фильтрационное горение газов // *Физика горения и взрыва*. 1983. Т. 19, № 2. С. 17–26.
18. **Babkin V. S.** Filtrational combustion of gases. Present state of affairs and prospects // *Pure and Appl. Chem.* 1993. V. 65. P. 335–344.
19. **Алдушин А. П., Мержанов А. Г.** Теория фильтрационного горения: общие представления и состояние исследований // *Распространение тепловых волн в гетерогенных средах / Под ред. Ю. Ш. Матроса.* Новосибирск: Наука, 1988. С. 9–52.

1. **Masters J., Webb R. J.** The development of a recuperative burner for gas-fired furnaces // *Proc.*



20. Киселев О. В., Матрос Ю. Ш., Чумакова Н. А. Явление распространения теплового фронта в слое катализатора // Там же. С. 145–203.
21. Манелис Г. Б. Сверхадиабатика // Природа. 1996. № 3–4. С. 43.
22. Киселев О. В., Матрос Ю. Ш. и др. Осуществление каталитических процессов в режиме формирования и распространения теплового фронта в неподвижном слое катализатора // Распространение тепловых волн в гетерогенных средах / Под ред. Ю. Ш. Матроса. Новосибирск: Наука, 1988. С. 203–233.
23. **Научный** отчет по контракту 36/92. Развить технические требования для новой технологии утилизации шахтного метана «Пушпул» / Институт химической кинетики и горения СО РАН. Новосибирск, 1992.
24. Hoffmann J. G., Echigo R., Yoshida H., and Tada S. Experimental study on combustion in porous media with a reciprocating flow system // Combust. Flame. 1997. V. 111. P. 32–46.
25. Kubota N., Ichida M. Combustion processes of propellants with embedded metal wires // AIAA Journal. 1980. V. 20, N 1. P. 116–121.
26. Рыбанин С. С., Стесик Л. Н. Теория горения конденсированного топлива с плоским теплопроводящим элементом // Физика горения и взрыва. 1974. Т. 10, № 5. С. 634–643.
27. Мержанов А. Г., Дворянкин А. В., Струнина А. Г. Новая разновидность спинового горения // Докл. АН СССР. 1982. Т. 267. С. 869–872.
28. Новожилов Б. В. Квазистационарная теория спирального режима горения // Докл. АН. 1993. Т. 330, № 2. С. 217–219.
29. Бабушок В. И., Симоненко В. Н., Бабкин В. С. Спиновое горение бенгальской свечи // Физика горения и взрыва. 1993. Т. 29, № 5. С. 103–104.
30. Шкадинский Г. К., Хайкин Б. И., Мержанов А. Г. Распространение пульсирующего фронта экзотермической реакции в конденсированной фазе // Физика горения и взрыва. 1971. Т. 7, № 1. С. 19–28.
31. Korzhavin A. A., Bunev V. A. et al. On one regime of low-velocity detonation in porous media // Gaseous and Heterogeneous Detonations: Science to Applications / G. D. Roy et al. (Eds). Moscow: ENAS Publishers, 1999. P. 255–268.
32. Коржавин А. А., Бунев В. А., Гордиенко Д. М., Бабкин В. С. Поведение пламен, распространяющихся по пленкам жидкости на металлических подложках // Физика горения и взрыва. 1998. Т. 34, № 3. С. 15–18.
33. Манелис Г. Б., Полианчик Е. В., Фурсов В. П. Энерготехнологии сжигания на основе явления сверхадиабатических разогревов // Химия в интересах устойчивого развития. 2000. Т. 8, № 4. С. 537–545.

*Поступила в редакцию 20/IV 2001 г.*