

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ДВУХ ДИФфуЗИОННЫХ ПЛАМЕН, РАСПРОСТРАНЯЮЩИХСЯ ВДОЛЬ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПОДЛОЖКИ, СМОЧЕННОЙ РАЗЛИЧНЫМИ ТОПЛИВАМИ

А. А. Коржавин, И. Г. Намятов, В. А. Бунев, В. С. Бабкин

Институт химической кинетики и горения СО РАН, 630090 Новосибирск, korzh@kinet.nsc.ru

Экспериментально и теоретически исследовано взаимодействие двух диффузионных пламен, распространяющихся по поверхности двух различных жидких топлив, нанесенных на тонкую металлическую подложку с двух сторон. Показано, что в такой системе возможно образование единого комплекса — двухстороннего пламени, обладающего свойствами стационарного пламени со своей структурой. Определены некоторые скоростные и структурные зависимости для двухсторонних пламен. Предложена математическая модель двухстороннего пламени, удовлетворительно описывающая экспериментальные зависимости. Сформулирована физическая модель двухстороннего пламени с пульсирующим пламенем более тяжелого топлива.

Ключевые слова: термически тонкие системы, диффузионные пламена, поверхностное горение, жидкие углеводородные топлива.

При изучении распространения пламени по поверхности сложных топлив таких, как древесина, бумага, полимеры, основные трудности состоят в скудности сведений о характере и кинетике химического превращения, а также в осуществлении раздельного исследования влияния на характеристики горения реакционной способности топлива и его теплофизических свойств. Для преодоления этих трудностей предложен подход, включающий изучение пламен, распространяющихся по пленкам жидких топлив, нанесенных на металлические подложки [1]. Авторами исследованы многие аспекты таких пламен, режимы горения, параметрические зависимости, скорости, пределы распространения и т. д. [2–4].

Если в таких системах используются подложки из тонкой фольги, то кроме односторонних пламен, распространяющихся по одной стороне фольги, как показано в [4], могут существовать и двухсторонние пламена, если топлива, в общем случае разные, нанесены на обе стороны подложки. В определенных условиях эти пламена могут образовывать единый комплекс — двухстороннее пламя, обладающее свойствами стационарного пламени со своей собственной структурой. В настоящей работе исследовалось взаимодействие диффузионных пламен, распространяющихся в одном

направлении по поверхности двух различных жидких топлив, нанесенных на обе стороны металлической фольги.

### МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Методика проведения экспериментов описана в [1–3]. Использовалась полоса медной фольги толщиной 45 мкм, шириной  $w = 4$  см и длиной до 2 м. Полоса располагалась вертикально. В качестве топлив брали нормальные алканы гомологического ряда  $C_nH_{2n+2}$ . Толщина жидких пленок составляла  $5 \div 10$  мкм. Эксперименты проводились следующим образом. В каждой серии опытов на одну сторону подложки наносилось одно и то же из выбранных топлив с  $n_1 = 9, 10, 11$ , а на другую — один из углеводородов с  $n_2 \geq n_1$ . Здесь  $n$  — номер углеводорода в гомологическом ряду, индекс при  $n$  обозначает сторону фольги. Затем проводилось одновременное зажигание топлив в верхней части полосы фольги. После некоторого нестационарного периода формировался комплекс двух пламен — двухстороннее пламя, распространяющееся сверху вниз с постоянной скоростью. Для измерения скорости пламени, его размеров и расстояния между пламенами  $\Delta L$  использовалась видеокамера с частотой записи 25 кадр/с. Температура подложки измерялась термопарой, которая представляла собой константановую проволоку диаметром 100 мкм, приваренную к медной

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (номер проекта 00-03-32417).

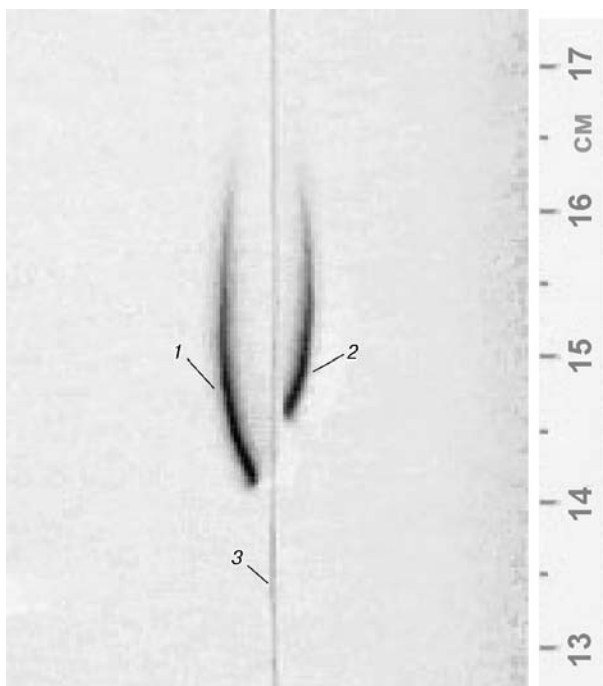


Рис. 1. Распространение диффузионных пламен *n*-нонана (1) и *n*-тридекана (2) по металлической фольге (3)

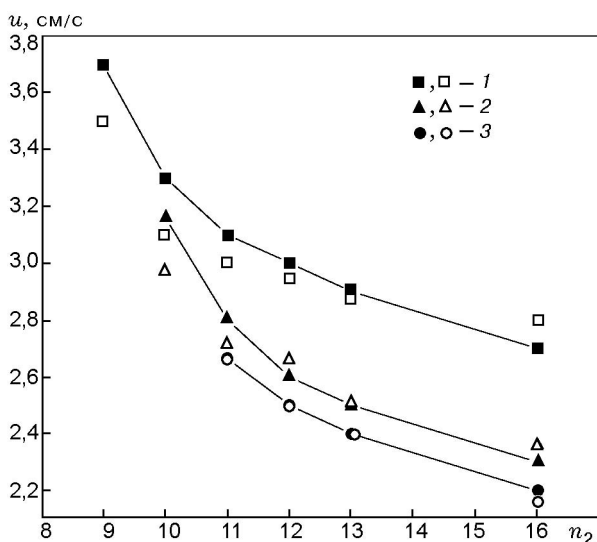


Рис. 2. Зависимость скорости распространения двухстороннего пламени от вида второго топлива:

первое топливо: 1 — *n*-нонан, 2 — *n*-декан, 3 — *n*-ундекан; светлые знаки — эксперимент, темные — расчет

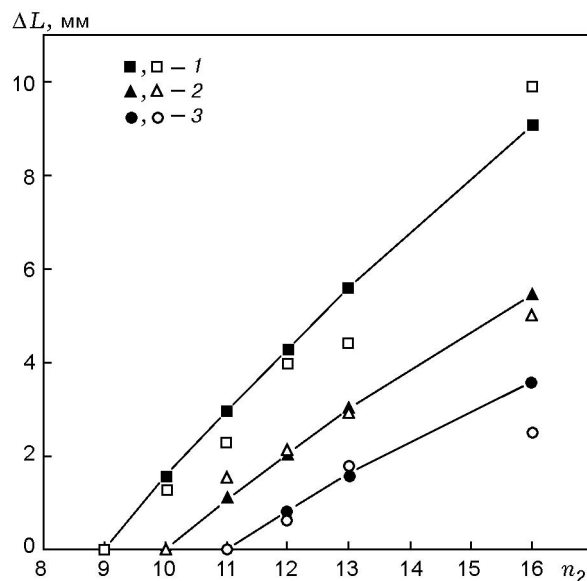


Рис. 3. Зависимость расстояния между пламенами при распространении двухстороннего пламени от вида второго топлива:

первое топливо: 1 — *n*-нонан, 2 — *n*-декан, 3 — *n*-ундекан; светлые знаки — эксперимент, темные — расчет

фольге точечной сваркой. Отличные от названных условия экспериментов оговорены особо в тексте статьи. На рис. 1 показано распространение комплекса двух пламен: первого пламени — по пленке *n*-нонана толщиной 7 мкм, второго — по пленке *n*-тридекана толщиной 8 мкм. Комплекс распространялся с постоянной скоростью 3 см/с. Видно, что пламя *n*-тридекана располагается за пламенем *n*-нонана на расстоянии  $\Delta L = 5$  мм, измеренном между передними кромками пламен.

На рис. 2 приведены зависимости скорости распространения двухстороннего пламени от вида второго топлива для трех углеводородов, используемых как первое топливо: *n*-нонан ( $n_1 = 9$ ), *n*-декан ( $n_1 = 10$ ), *n*-ундекан ( $n_1 = 11$ ). Видно, что для каждого выбранного в качестве первого топлива углеводорода скорость пламени уменьшается с увеличением номера углеводорода в его гомологическом ряду. У пламен тяжелых углеводородов соответственно более высокая температура кипения (см. таблицу) и более низкая скорость распространения. Зависимости  $u(n_2)$  при разных  $n_1$  — монотонные. Самые высокие скорости наблюдаются у пламен легких углеводородов и у пламен одинаковых углеводородов на обеих сторонах фольги с минимальным номером в гомоло-

Вещество	Теплота испарения, кДж/кг [5]	Нижний температурный предел*, °C [6]	Температура стехиометрического состава **, $T_v$ , °C	Температура кипения, °C [6]	Стехиометрическая концентрация, % (по объему)	Тепловой эффект, кДж/моль [6]	Теплосодержание стехиометрической смеси, кДж/моль
C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>	353,6	31	39,6	150,79	1,49	5731	84,73
C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>	339,9	46	58,0	174,12	1,34	6346	84,86
C <sub>11</sub> H <sub>24</sub>	360,7	62	73,5	195,98	1,22	6960	84,96
C <sub>12</sub> H <sub>26</sub>	360,2	76	88,0	216,28	1,12	7575	85,60
C <sub>13</sub> H <sub>28</sub>	359,5	90	101,9	235,47	1,04	8190	85,14
C <sub>16</sub> H <sub>34</sub>	358,3	126	135,4	287,05	0,85	10034	85,31
C <sub>18</sub> H <sub>38</sub>	355,3	—	158,0	317,38	0,76	11263	85,39
C <sub>4</sub> H <sub>9</sub> OH	590,4	34	45,0	117,50	3,38	2728	92,20

Примечания. \*Нижний температурный предел распространения пламени по парам топлива. \*\*Температура, при которой над поверхностью жидкости в равновесных условиях образуется паровоздушная смесь стехиометрического состава.

гическом ряду, самые низкие скорости — у тяжелых углеводородов. По мере роста  $n_2$  можно ожидать срыв горения. Действительно, в случае  $n_1 = 9$ ,  $n_2 = 18$  и  $n_1 = 9$ ,  $n_2 = 21$  не удалось получить двухстороннее пламя.

На рис. 3 приведены экспериментальные зависимости  $\Delta L(n_2)$  при разных  $n_1$ . Видно, что чем больше молекулярная масса второго углеводорода  $n_2$ , тем больше расстояние между пламенами.

Еще одна особенность двухсторонних пламен — существование режима продольно пульсирующего горения. Такой режим наблюдался, в частности, в системе  $n_1 = 9$ ,  $n_2 = 16$  при начальной температуре 12,8 °C. Пламя, распространяющееся по поверхности  $n$ -гексадекана, совершает колебания вдоль медной подложки с частотой 5 Гц (рис. 4). При этом пламя полностью не исчезает. Его передняя кромка располагается за кромкой ведущего пламени (с другой стороны фольги) и совершает колебания между двумя положениями (относительно передней кромки). В системе координат, движущейся с ведущим пламенем, одно положение удалено на значительное расстояние от кромки ведущего пламени, второе положение находится вблизи его кромки. Остающийся после очередного колебания очаг горения выполняет роль воспламенителя («дежурного факела») (первый и третий кадры).

В специальных опытах с бронированием краев фольги было показано, что ведущее пламя, находящееся на другой стороне фольги, не участвует в зажигании вновь подготовленной смеси. С помощью высокоскоростной видеосъемки (500 кадр/с) показано также, что «дежурный факел» не гаснет. Колебания ведомого пламени отражаются на профиле температуры подложки. На осциллограммах температуры наблюдаются колебания, наложенные на плавный профиль. Частота этих колебаний совпадает с частотой, измеренной посредством записи сигналов светимости пламени с помощью фотодиодов.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Математическая модель распространения двухсторонних пламен базируется на основных допущениях одностороннего пламени [3], а именно: предположение о термически тонкой системе и предположение об основном пути передачи тепла в зону подготовки горючей смеси по металлической подложке. Первое допущение следует из оценки характерных времен распространения пламени вдоль подложки и поперечного ее прогрева, второе основано на соответствующих оценках и хорошем согласии математической и физической моделей явления в широком диапазоне различных параметров. Согласно физической модели односто-

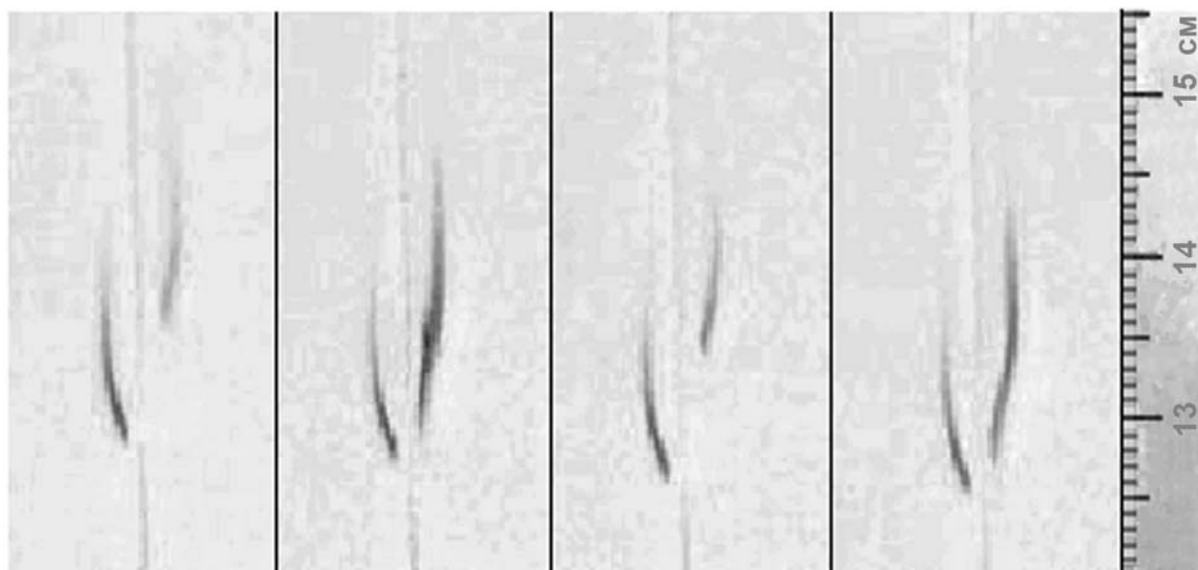


Рис. 4. Пульсирующее распространение сверху вниз пламени *n*-декана и *n*-гексадекана над медной фольгой ( $w = 1$  см),  $u = 2,63$  см/с,  $T_0 = 12,8$  °С, частота кадров 25 Гц

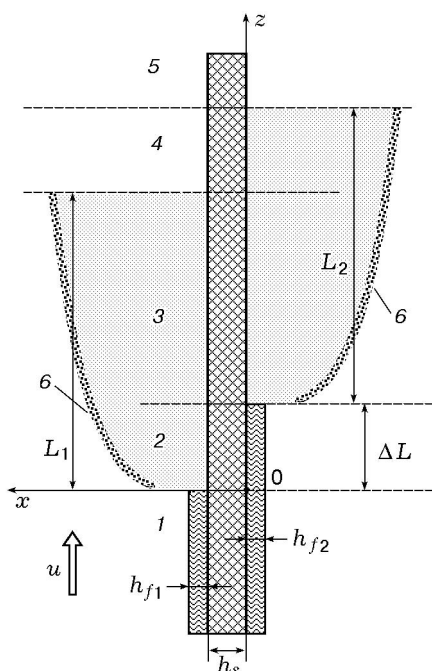


Рис. 5. Схема распространения пламени:  
 1 — зона подогрева (температура газовой фазы  $T_0$ ), 2 — зона прогрева ведущим пламенем, 3 — зона прогрева обоими пламенами, 4 — зона прогрева ведомым пламенем, 5 — зона охлаждения, 6 — фронты пламени

ронного пламени тепло из зоны горения нагревает металлическую подложку и за счет теплопроводности подложки распространяется в предпламенную зону и в зону тепловой релаксации за зоной горения. В предпламенной зоне за счет поступившего тепла топливо прогревается и испаряется. Передняя кромка пламени располагается над подложкой с координатой, где температуре подложки  $T_v$  отвечает парциальное давление паров топлива, достаточное для создания горючей смеси стехиометрического состава в равновесных условиях.

В случае двухстороннего пламени картина усложняется. Здесь химически независимые пламена могут создавать единый комплекс со свойствами стационарного пламени с собственной структурой, скоростью и пределами распространения, механизмом устойчивой стабилизации пламен. Эти пламена можно назвать ведущим (первым) и ведомым (вторым), так как ведомое пламя распространяется на обратной стороне подложки в следе ведущего. Однако, как видно из рис. 2, ведомое пламя не является функционально «инертным» и существенно влияет на скорость распространения ведущего пламени.

По характеру межфазного теплообмена в модели двухстороннего пламени можно выделить пять зон (рис. 5). В зонах 1 и 5 температура газа принята равной температуре окружающей среды  $T_0$ , тепловой поток направлен от

твердой фазы в газовую. В зонах 2 и 3 (область  $L_1$ ) происходит основное химическое превращение в ведущем пламени. Зоны 3, 4 относятся к области ведомого пламени  $L_2$ . Предполагается, что в областях горения  $L_1$  и  $L_2$  газ имеет температуру соответствующих пламен  $T_b$ . Вне областей горения, в зоне 2 со стороны ведомого пламени и в зоне 4 со стороны ведущего пламени, газ имеет температуру  $T_0$ . В зоне 2 подложка нагревается ведущим пламенем и охлаждается с обратной стороны. В зоне 4, наоборот, подложка нагревается со стороны ведомого пламени и охлаждается со стороны ведущего. Для упрощения модели предполагается, что впереди передних кромок пламени толщина пленок жидкостей постоянна и равна  $h_{f1}$  и  $h_{f2}$  для ведущего и ведомого пламен, соответственно. Позади кромок толщины  $h_{f1}$  и  $h_{f2}$  приняты равными нулю.

Для термически тонкой системы можно пренебречь распределением температуры в поперечном направлении и после осреднения по  $x$  одномерная система уравнений теплового баланса к-фазы (металлической подложки и пленок жидкого топлива) запишется в следующем виде:

$$\begin{aligned} u \frac{dT_1}{dz} - \alpha_1 \frac{d^2 T_1}{dz^2} + 2\omega_1(T_1 - T_0) &= 0, \\ u \frac{dT_2}{dz} - \alpha_2 \frac{d^2 T_2}{dz^2} + \omega_2(2T_2 - T_b - T_0) &= 0, \\ u \frac{dT_3}{dz} - \alpha_s \frac{d^2 T_3}{dz^2} + 2\omega_s(T_3 - T_b) &= 0, \quad (1) \\ u \frac{dT_4}{dz} - \alpha_s \frac{d^2 T_4}{dz^2} + \omega_s(2T_4 - T_b - T_0) &= 0, \\ u \frac{dT_5}{dz} - \alpha_s \frac{d^2 T_5}{dz^2} + 2\omega_s(T_5 - T_0) &= 0, \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} \omega_1 &= \frac{\alpha}{c_s \rho_s h_s + c_{f1} \rho_{f1} h_{f1} + c_{f2} \rho_{f2} h_{f2}}, \\ \omega_2 &= \frac{\alpha}{c_s \rho_s h_s + c_{f2} \rho_{f2} h_{f2}}, \quad \omega_s = \frac{\alpha}{c_s \rho_s h_s}, \\ \alpha_1 &= \frac{\lambda_{f1} h_{f1} + \lambda_{f2} h_{f2} + \lambda_s h_s}{c_{f1} \rho_{f1} h_{f1} + c_{f2} \rho_{f2} h_{f2} + c_s \rho_s h_s}, \end{aligned}$$

$$\alpha_2 = \frac{\lambda_{f2} h_{f2} + \lambda_s h_s}{c_{f2} \rho_{f2} h_{f2} + c_s \rho_s h_s}, \quad \alpha_s = \frac{\lambda_s}{c_s \rho_s},$$

$\alpha$  — коэффициент межфазного теплообмена,  $\lambda$  — теплопроводность,  $\rho$  — плотность,  $c$  — теплоемкость,  $h$  — толщина, индексы  $s, f1, f2$ , относятся к подложке и топливам в ведущем и ведомом пламенах,  $T_1 \div T_5$  — температуры подложки в зонах 1  $\div$  5, выделенных на рис. 5. В уравнениях сделано допущение, что температуры пламен одинаковы и равны  $T_b$ .

На границе зон температуры непрерывны. Градиенты температуры на границе зон 3–4 и зон 4–5 непрерывны, а на границе зон 1–2 и 2–3 имеется скачок, обусловленный потерей тепла на испарение жидкого топлива. На границах зон выполняются условия:

$$z \rightarrow -\infty, \quad T_1 \rightarrow T_0; \quad z \rightarrow \infty, \quad T_5 \rightarrow T_0; \quad (2)$$

$$z = 0, \quad T_1 = T_2 = T_{v1},$$

$$\begin{aligned} \alpha_2 \frac{dT_2}{dz} \Big|_{z=0} &= \alpha_1 \frac{dT_1}{dz} \Big|_{z=0} + \\ &+ \frac{q_{v1} u}{c_{f1}} \ln \left( 1 + \frac{c_{f1} \rho_{f1} h_{f1}}{c_s \rho_s h_s + c_{f2} \rho_{f2} h_{f2}} \right); \quad (3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} z = \Delta L, \quad T_2 = T_3 = T_{v2}, \quad \alpha_3 \frac{dT_3}{dz} \Big|_{z=\Delta L} &= \\ = \alpha_2 \frac{dT_2}{dz} \Big|_{z=\Delta L} + \frac{q_{v2} u}{c_{f2}} \ln \left( 1 + \frac{c_{f2} \rho_{f2} h_{f2}}{c_s \rho_s h_s} \right); \quad (4) \end{aligned}$$

$$z = L_1, \quad T_3 = T_4, \quad \frac{dT_3}{dz} \Big|_{z=L_1} = \frac{dT_4}{dz} \Big|_{z=L_1}; \quad (5)$$

$$\begin{aligned} z = \Delta L + L_2, \quad T_4 = T_5, \quad \frac{dT_4}{dz} \Big|_{z=\Delta L + L_2} &= \\ = \frac{dT_5}{dz} \Big|_{z=\Delta L + L_2}. \quad (6) \end{aligned}$$

Здесь  $q_{v1}$  и  $q_{v2}$  — теплоты испарения первого и второго топлив,  $T_{v1}$  и  $T_{v2}$  — температуры подложки, соответствующие положениям передних кромок пламен,  $\Delta L$  — расстояние между кромками пламен. Граничные условия (3), (4) связывают потоки тепла в подложке с учетом теплоты испарения топлива. Вывод этих уравнений представлен в [3].

Решение системы уравнений (1) для каждой из пяти зон имеет вид

$$T_i = C_i + A_i \exp(\lambda_{i+}z) + B_i \exp(\lambda_{i-}z), \quad (7)$$

где  $i$  — номер области,  $\lambda_{i\pm} = \frac{u \pm \sqrt{u^2 + 8\alpha_i \omega_i}}{2\alpha_i}$ , константы  $C_i$ ,  $A_i$ ,  $B_i$  находятся подстановкой соответствующих уравнений из системы (1) в граничные условия на бесконечности (2) и в (5), (6). Подставляя уравнения (7) для областей 1–2 и 3–4 в граничные условия (3) и (4), получим систему из двух трансцендентных уравнений:

$$\begin{aligned} \alpha_2(\lambda_{2+}A_2 + \lambda_{2-}B_2) &= \lambda_{1+}\alpha_1(T_{v1} - T_0) + \\ &+ \frac{q_{v1}u}{c_{f1}} \ln \left( 1 + \frac{c_{f1}\rho_{f1}h_{f1}}{c_s\rho_s h_s + c_{f2}\rho_{f2}h_{f2}} \right), \\ \alpha_3(\lambda_{3+}A_3 e^{(\lambda_{3+}\Delta L)} + \lambda_{3-}B_3 e^{(\lambda_{3-}\Delta L)}) &= \\ &= \alpha_2(\lambda_{2+}A_2 e^{(\lambda_{2+}\Delta L)} + \\ &+ \lambda_{2-}B_2 e^{(\lambda_{2-}\Delta L)}) + \frac{q_{v2}u}{c_{f2}} \ln \left( 1 + \frac{c_{f2}\rho_{f2}h_{f2}}{c_s\rho_s h_s} \right). \end{aligned}$$

Решение этой системы для нахождения скорости распространения двухстороннего пламени  $u$  и расстояния между пламенами  $\Delta L$  находилось численным методом. Необходимые для решения значения плотности, теплоемкости, теплопроводности топлив и подложки, теплоты испарения и давления насыщенных паров топлив для определения  $T_v$  взяты из справочников [5–7]. Обоснование выбора коэффициента теплообмена  $\alpha$  и других параметров задачи представлено в [3]. В данной работе использовались те же численные значения этих параметров:  $\alpha = 23 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ , температура в области продуктов горения  $T_b = 2000 \text{ К}$ , толщина пленки топлива под кромкой пламени 3 мкм.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Сравнение экспериментально измеренных скоростей распространения двухсторонних пламен с расчетными значениями приведено на рис. 2. Видно, что экспериментальные и расчетные результаты хорошо согласуются для разных пар топлив. Наибольшее отклонение наблюдается для относительно легких

топлив. Это связано с тем, что для топлив, у которых значение  $T_v$  близко к  $T_0$ , модель дает завышенные значения скорости, обусловленные подходом к границе применимости модели.

Как и для односторонних пламен, наблюдается следующая тенденция: чем ниже  $T_{v1}$  и  $T_{v2}$ , тем быстрее распространяется двухстороннее пламя. Максимальные скорости соответствуют пламенам с одинаковым и минимальным значением  $n$ . Подтверждается вывод [3] о том, что для одного и того же топлива отношение скоростей двухстороннего и одностороннего пламен равно  $\sqrt{2}$ .

В расчетах варьировались длины пламен  $L_1$  и  $L_2$ . Оказалось, что при длине пламен больше 1 см скорость распространения и расстояние между пламенами не зависят от  $L_1$  и  $L_2$ . Измерения длины светящейся зоны при обработке видеосъемки пламен различных топлив дают значения длины пламени в диапазоне 1,5 ÷ 3 см. Оценку длины пламени можно также сделать и по записи зависимости температуры от координаты  $z$ . При такой обработке длиной пламени, распространяющегося с одной стороны, считалось расстояние от точки, соответствующей температуре  $T_v$ , до точки максимума температуры. Эта оценка дает большую длину ( $L = 3 \div 6 \text{ см}$ ). Наилучшее приближение расчетных зависимостей температуры от координаты к экспериментальным данным по распределению температуры дает значение  $L_1 = L_2 = 3,5 \text{ см}$ , которое и использовалось в дальнейших расчетах.

Что касается структуры пламени, то прежде всего следует отметить устойчивость двухсторонних пламен и характерный сдвиг в расположении кромок ведущего и ведомого пламен. Сдвиг  $\Delta L$  и скорость  $u$  для данной пары топлив остаются постоянными как в течение одного опыта, так и от опыта к опыту. Максимальным значениям  $\Delta L$  отвечают наиболее удаленные по  $n$  пары топлив в гомологическом ряду алканов.

На рис. 6 приведено распределение температуры вдоль медной подложки для пары топлив —  $n$ -декан/ $n$ -гексадекан. Хорошее согласие расчетных и экспериментальных результатов наблюдается в зонах до точки с максимальной температурой  $T_{\max}$ . Расхождение за точкой  $T_{\max}$  обусловлено, по-видимому, некорректностью модели при описании зоны тепловой релаксации. В модели принято, что тем-

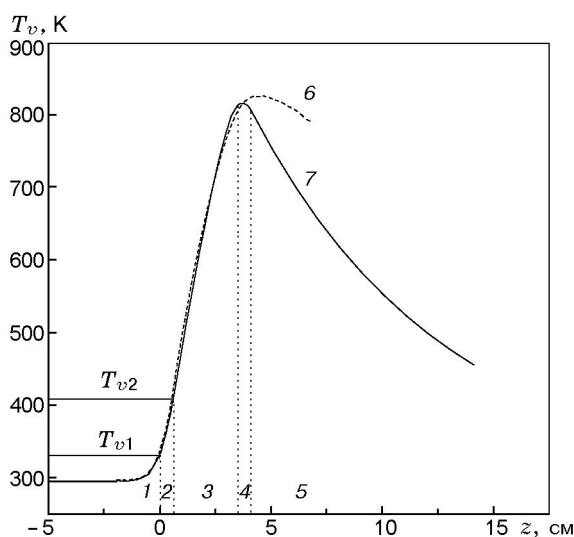


Рис. 6. Зависимость температуры подложки от координаты:

система  $C_{10}H_{22}-C_{16}H_{34}$  на медной подложке толщиной 45 мкм; 1 — зона подогрева, 2 — зона прогрева ведущим пламенем ( $C_{10}H_{22}$ ), 3 — зона прогрева обоими пламенами, 4 — зона прогрева ведомым пламенем ( $C_{16}H_{34}$ ), 5 — зона охлаждения, 6 — экспериментальные данные, 7 — расчет

температура газа за каждым пламенем снижается скачком с  $T_b$  до  $T_0$ . В действительности эксперименты по измерению длины пламени по свечению и профилю температуры показывают, что горячие продукты сгорания продолжают обтекать фольгу и после исчезновения свечения, поэтому температура фольги снижается медленнее, чем в модельных предположениях.

Наглядным результатом теплового взаимодействия пламен на противоположных сторонах фольги являются кооперативные эффекты, заключающиеся во взаимной тепловой поддержке. При тепловом взаимодействии подложка получает больше тепла, возрастают температура и ее градиент. В результате увеличиваются скорость и устойчивость двухстороннего пламени, появляются новые режимы горения, расширяются пределы существования. Только благодаря ведущему пламени возможно, например, воспламенение и сгорание *n*-гексадекана в паре с *n*-деканом при температуре 12,8 °С на медной подложке толщиной 45 мкм.

Из рис. 2 видно, что с увеличением номера второго топлива его влияние на скорость распространения пламени падает. Это означает, что ослабевает тепловая связь двух пламен. Следует отметить, что если  $n_1 < 12$ , то пламя первого топлива способно распространяться и

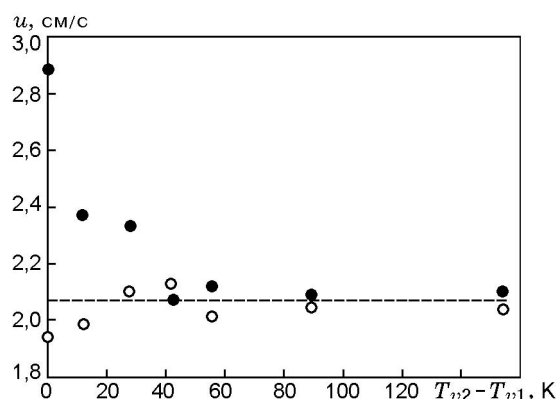


Рис. 7. Зависимость скорости распространения двухстороннего (темные кружки) и одностороннего (светлые кружки) пламен в системе «*n*-бутанол — второе топливо» от разности характерных температур этих топлив ( $T_{v2}$ ) и бутанола ( $T_{v1}$ ):

в качестве второго топлива использовались (по возрастанию разности температур):  $C_4H_9OH$ ,  $C_{10}H_{22}$ ,  $C_{11}H_{24}$ ,  $C_{13}H_{28}$ ,  $C_{16}H_{34}$ , трансформаторное масло; медная фольга толщиной 60 мкм,  $T_0 = 19$  °С

без поддержки второго. При  $n_1 \geq 12$  распространение пламени возможно только при зажигании обоих пламен, при этом в обоих случаях скорость зависит от свойств второго пламени. В этом смысле можно применить термин «режим управления», введенный в [8] для классификации характера взаимодействия стадий в гомогенных пламенах.

Действительно, двухстороннее пламя также можно рассматривать как стадийное. Однако в отличие от пламен с последовательными стадиями, в которых химические реакции стадий жестко связаны, в двухстороннем пламени оба пламени независимы в химическом аспекте. Стадийность проявляется только в тепловом аспекте. В некоторой степени величина  $\Delta L$  (или  $\Delta T_v$ ) характеризует «тепловую стадийность». В пределе  $\Delta L \rightarrow 0$  оба пламени становятся симметричными и одностадийными в тепловом отношении. В этом смысле можно применить термин «режим слияния».

В противоположном случае (увеличении  $\Delta L$ ) второе пламя либо незначительно влияет на скорость первого, либо совсем не влияет. Исследование проводилось в системе «*n*-бутанол — медная фольга толщиной 60 мкм — второе топливо». Выбор *n*-бутанола в качестве первого топлива обусловлен его более высокой теплотой испарения по сравнению

с предельными углеводородами (см. таблицу). Испарение снижает передачу тепла от второго пламени к первому. В качестве второго топлива использовались предельные углеводороды с  $n_2 = 10, 11, 12, 13, 16$  и трансформаторное масло. Для последнего принималось  $T_{v2} = 200^\circ\text{C}$ . Экспериментальные данные представлены на рис. 7 в виде зависимости скорости распространения пламени в такой системе от разности температур  $T_{v2} - T_{v1}$ . Видно, что с ростом разности температур скорость двухстороннего пламени (темные кружки) падает, стремясь к асимптотическому значению, совпадающему со значением скорости распространения одностороннего пламени (светлые кружки; с нанесением, но без зажигания второго топлива). К этому предельному режиму можно применить термин «режим отрыва» [8].

Устойчивость двухстороннего пламени несомненно связана с его структурой. Как одно-, так и двухсторонние пламена имеют профиль температуры с восходящей и нисходящей ветвями зависимости  $T_v(z)$ . Опыт показывает, что в двухсторонних пламенах точки  $T_{v1}$  и  $T_{v2}$  располагаются на восходящей ветви. Нетрудно убедиться, что положение кромок пламен в этих точках устойчиво. Случайный сдвиг их влево или вправо вызывает компенсирующее изменение структуры.

Вместе с тем анализ модифицированной математической модели с  $\Delta L > L_1$  показывает, что, в принципе, возможен двугорбый профиль температуры подложки с точкой  $T_{v2}$ , расположенной за первым максимумом температуры (рис. 8). Такая стационарная конфигурация в эксперименте пока не наблюдалась, и, видимо, она неустойчива, так как случайный сдвиг влево или вправо вызывает усиление возмущения. Эта конфигурация со временем вырождается в одностороннюю с одним или двумя пламенами. В последнем случае максимум температуры определяется тепловыми эффектами обоих пламен и точки  $T_{v1}$  и  $T_{v2}$  будут находиться на восходящей ветви зависимости  $T_v(z)$ . Можно предположить, что существует некоторое критическое значение температуры  $T^*$  подложки, при котором возможно существование двухсторонних пламен и для которого должно выполняться соотношение

$$T_{v2} < T^*. \quad (8)$$

По-видимому, такое же условие справедливо и для односторонних пламен  $T_v < T^*$ .

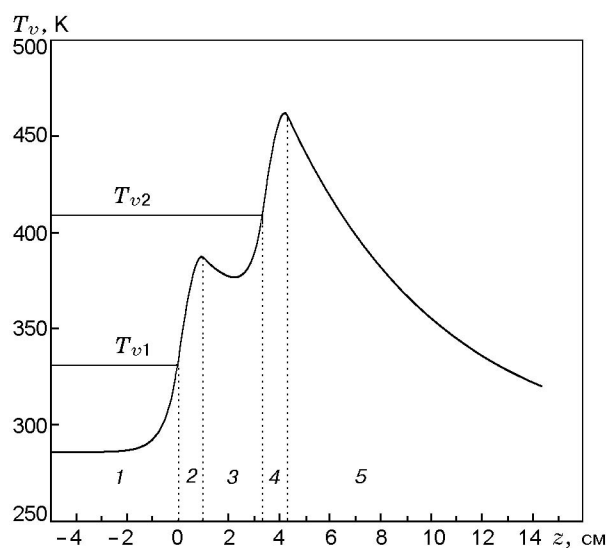


Рис. 8. Зависимость температуры подложки от координаты:

система  $\text{C}_{10}\text{H}_{22}-\text{C}_{16}\text{H}_{34}$  на медной подложке толщиной 45 мкм; второе пламя на нисходящей ветви; 1 — зона подогрева, 2 — зона прогрева ведущим пламенем ( $\text{C}_{10}\text{H}_{22}$ ), 3 — зона охлаждения, 4 — зона прогрева ведомым пламенем ( $\text{C}_{16}\text{H}_{34}$ ), 5 — зона охлаждения

Условие (8) может быть нарушено как слева, так и справа. Слева — за счет низкой «летучести» второго топлива, т. е. низкого парциального давления насыщенных паров (высоких значений  $T_{v2}$ ). В качестве примера можно привести двухсторонние пламена  $n$ -додекан/ $n$ -тридекан или  $n$ -додекан/ $n$ -гексадекан на медной фольге толщиной 60 мкм при  $T_0 = 19,6^\circ\text{C}$ . Скорости пламен соответственно равны 2,1 и 1,9 см/с. Если в качестве второго топлива взять  $n$ -октадекан, то пламя в такой системе не распространяется вообще ни по какому топливу.

Нарушение справа означает снижение «порога»  $T^*$ , которое может быть вызвано увеличением расстояния между пламенами при снижении  $T_{v1}$ . Увеличение расстояния между пламенами вызывает снижение как максимальной температуры, так и  $T^*$ . Это обусловлено как увеличением площади теплопотерь в зонах 2 и 4 (незначительно), так и (главным образом) увеличением общей теплоемкости (увеличение суммарной длины зон 1÷5), воспринимающей тепло от пламен. В рассмотренной выше системе  $n$ -додекан/ $n$ -гексадекан на медной фольге толщиной 60 мкм при  $T_0 = 19,6^\circ\text{C}$  замена  $n$ -додекана более легким топливом  $n$ -нонаном приводит к нестабильному распространению



пламени над пленкой  $n$ -нона с последующим его срывом и к полному прекращению распространения пламени.

В обоих случаях срыв горения происходит, по нашему мнению, из-за уменьшения потоков топлив с подложки в газовую фазу и гашения реакции в области ведомых пламен. Срыв пламени не связан с увеличением теплопотерь во внешнюю среду и в этом смысле можно говорить об адиабатическом пределе, аналогичном рассматриваемому в [9].

Режим пульсирующего горения с продольными пульсациями ведомого пламени следует рассматривать как разновидность двухстороннего пламени. Во-первых, пульсации пламени наблюдаются в структуре двухстороннего пламени. Во-вторых, пульсирующее пламя возникает и исчезает, а само ведомое пламя существует постоянно. Ведомое пламя выполняет роль «дежурного факела», инициирующего пульсирующее пламя впереди себя. Поскольку явление наблюдается при больших значениях  $n_2$ , чему соответствуют большие расстояния  $\Delta L$  и малые скорости тепловой волны  $u$ , то можно предположить, что в пульсирующем пламени сгорает горючая смесь второго топлива, относительно медленно накапливающаяся перед кромкой ведомого пламени благодаря большим временам пребывания жидкого топлива при повышенной температуре. Из таблицы видно, что различие между нижним температурным пределом распространения пламени по парам топлива и температурой  $T_v$  невелико. Это означает, что режим пульсирующего горения реализуется в относительно узком динамическом интервале температуры.

Другая особенность пульсирующего пламени — высокая скорость распространения пульсации. В описанных выше опытах (см. рис. 4) амплитуда пульсаций составляет 1 см, а скорость продвижения пульсации вперед порядка 20 см/с, тогда как средняя скорость распространения 2,6 см/с. Этот факт позволяет представить следующую физическую модель явления. Из-за длительного пребывания тяжелого жидкого топлива при повышенной температуре подложки (обусловленного в основном горением первого топлива) над поверхностью второго топлива формируется слой горючей топливовоздушной смеси. Когда толщина слоя превышает гасящее расстояние смеси, смесь воспламеняется от ведомого пламени и сгорает со скоростью порядка нормальной ско-

рости второго топлива. Через некоторое время процесс повторяется, пламя, инициированное у кромки ведомого пламени, быстро распространяется вперед до кромки ведущего пламени (с другой стороны подложки).

## ВЫВОДЫ

Изучено взаимодействие двух диффузионных пламен, распространяющихся по фольге, смоченной с двух сторон топливами в общем случае различного типа. Показано, что в определенных условиях два пламени, связанные тепловым контактом, могут распространяться единым комплексом, с постоянной скоростью, образуя двухстороннее пламя.

Определены структурные характеристики двухстороннего пламени: форма пламен, их взаимное расположение, распределение температуры по металлической подложке. Определены некоторые характерные черты двухсторонних пламен: запаздывание второго пламени, коллективные эффекты в прогреве подложки, скорости распространения, критические явления, реализация пульсирующего горения второго топлива. Сформулирована физическая модель режима пульсирующего горения как разновидность двухстороннего пламени.

Построена зонная модель стационарного распространения двухсторонних пламен, и проведено сравнение экспериментальных и теоретических результатов. Удовлетворительное согласие экспериментальных и расчетных результатов по различным характеристикам двухстороннего пламени свидетельствует о корректности развиваемых физических представлений о механизме их распространения в термически тонкой системе «жидкое топливо — металлическая фольга — жидкое топливо».

## ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Коржавин А. А., Бунев В. А., Намятов И. Г., Бабкин В. С. Распространение пламени над пленкой жидкого топлива на металлических подложках // Физика горения и взрыва. 2000. Т. 36, № 3. С. 25–30.
3. Намятов И. Г., Минаев С. С., Бабкин В. С. и др. Диффузионное горение плен-

- ки жидкого топлива на металлической подложке // Физика горения и взрыва. 2000. Т. 36, № 5. С. 12–21.
4. **Korzhavin A. A., Bunev V. A., Namyatov I. G., et al.** Combustion regimes of liquid fuel film on thermally thin metallic substrate // Fire and Explosion Hazard: Proc. of the Third Intern. Seminar on Fire and Explosion Hazards / D. Bradley, D. Drysdale, G. Makhviladze. (Eds). Centre for Research in Fire and Explosion Studies, University of Central Lancashire, Preston, United Kingdom, 2001. P. 379–388.
  5. **Варгафтик Н. Б.** Справочник по физическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972.
  6. **Пожаровзрывоопасность** веществ и материалов и средства их тушения: Справ. изд.: В 2 кн. / А. Н. Баратов, А. Я. Корольченко, Г. Н. Кравчук и др. М.: Химия, 1990.
  7. **Таблицы** физических величин: Справочник / Под ред. И. К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976.
  8. **Мержанов А. Г., Хайкин Б. И.** Теория волн горения в гомогенных средах. Черноголовка: Ин-т структурной макрокинетике, 1992.
  9. **Новожилов Б. В.** Адиабатические пределы горения конденсированных систем // Докл. АН. 2001. Т. 378, № 3. С. 359–362.

*Поступила в редакцию 3/II 2003 г.*

---