

УДК 536.46

## ВЛИЯНИЕ НАЧАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ НА СКОРОСТЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ НАД ПЛЕНКОЙ ТОПЛИВА НА МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПОДЛОЖКЕ

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

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

Экспериментально исследовано влияние температуры окружающей среды в диапазоне от  $-42$  до  $25$  °С на скорость распространения пламени над пленками жидкого и твердого топлива на металлической подложке в термически тонкой системе. Показано, что предложенная ранее модель процесса распространения пламени удовлетворительно описывает зависимость скорости пламени от начальной температуры. Не обнаружено сильного влияния фазового перехода топлива в твердое состояние на скорость пламени. Предел стационарного распространения пламени обусловлен невозможностью обеспечить достаточную толщину испаряющейся пленки вследствие эффекта Марангони.

Ключевые слова: горение, термически тонкая система, жидкое топливо.

### ВВЕДЕНИЕ

В инертных средах с открытой пористой структурой, на поверхности которых находится тонкий слой жидкого топлива, может реализоваться испарительно-диффузионный низкоскоростной режим распространения пламени [1, 2]. Это происходит в той области начальных параметров, где образующаяся равновесная паровоздушная смесь находится вне области распространения пламени далеко за бедным пределом. Необходимая для горения смесь образуется в процессе самого горения в результате испарения жидкости и смешения паров топлива с окислителем. При экспериментальном изучении горения затруднительно широко варьировать теплофизические свойства пористых сред. Поэтому с целью расширения методологических возможностей и, в частности, раздельного изучения влияния теплофизических свойств и пространственных характеристик пористой среды, а также теплофизических и кинетических свойств топлив была выбрана модельная система «пленка топлива на металлической подложке». Под пленкой понимается тонкий слой топлива в жидком или твердом состоянии.

В работах [3, 4] представлены экспериментальные данные о влиянии начальной темпе-

ратуры на скорость распространения диффузионного пламени над пленкой жидкого топлива, нанесенного на металлическую подложку. Модель процесса, предложенная в [4], правильно описывает тенденции при изменении температуры. Однако сравнение проведено с малым объемом экспериментальных данных.

Цель данной работы — сопоставить теоретические и экспериментальные результаты на большом массиве экспериментальных данных, полученных для различных жидких топлив в диапазоне начальных температур от  $-42$  до  $+25$  °С, выяснить влияние фазового перехода топлива из твердого состояния в жидкое на скорость распространения пламени; выявить и описать различные особенности горения в системе вблизи предела распространения пламени, по возможности установить параметрические границы применимости модели и природу пределов распространения пламени.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Схема проведения экспериментов описана в [3]. В качестве топлива использовался ряд нормальных алканов с количеством атомов углерода 8–13, 16, а также этиловый спирт. Подложкой служила медная фольга толщиной 32 и 45 мкм. Следует отметить, что во всех случаях пленка топлива на металлической подложке являлась термически тонкой системой. Критерий термической тонкости выражается следующим образом: характерное время тепло-

Работа выполнена в рамках междисциплинарного проекта № 64 СО РАН, 2011.

© Коржавин А. А., Бунев В. А., Бабкин В. С., Намятов И. Г., 2012.

вой релаксации слоя «фольга — пленка топлива» в направлении, перпендикулярном распространению пламени, должно быть меньше характерного времени передачи тепла вдоль подложки в направлении распространения пламени. Полоса фольги шириной 4 см и длиной до 2 м, как правило, закреплялась вертикально. На одну или обе ее стороны наносилась пленка горючей жидкости при комнатной температуре. Толщина пленки топлива  $h_{f0}$  определялась по массе жидкости, находящейся на известной площади фольги, с точностью 10 % и составляла для разных топлив и образцов  $5 \div 10$  мкм. Затем образец выдерживали в помещении с пониженной температурой, при которой пленка либо оставалась жидкой, либо становилась твердой, что наблюдалось визуально. Зажигание производилось открытым пламенем у верхнего конца полосы фольги. После нестационарного периода зажигания одно- или двухстороннее пламя с постоянной скоростью распространялось вниз.

Во время опыта проводилась видеосъемка процесса. Из полученных первичных данных находили скорость распространения пламени.

### ДАННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

На рис. 1 приведены зависимости скорости распространения пламени над пленкой жидкого топлива, нанесенного с двух сторон на медную фольгу толщиной 32 и 45 мкм, от коли-

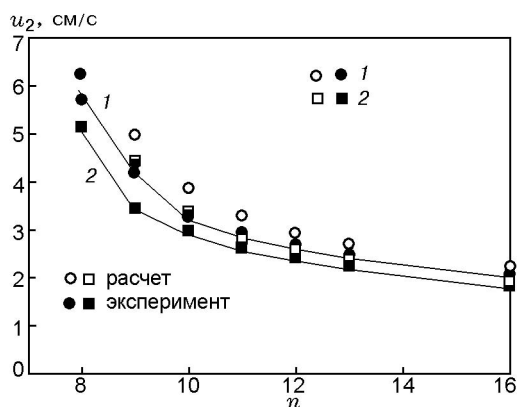


Рис. 1. Зависимость скорости пламени от числа атомов углерода ( $n$ ) в нормальных парафинах  $C_nH_{(2n+2)}$ :

пленка топлива с двух сторон медной фольги, толщина фольги: 1 — 32 мкм, 2 — 45 мкм, давление атмосферное, температура комнатная; линии проведены для удобства восприятия

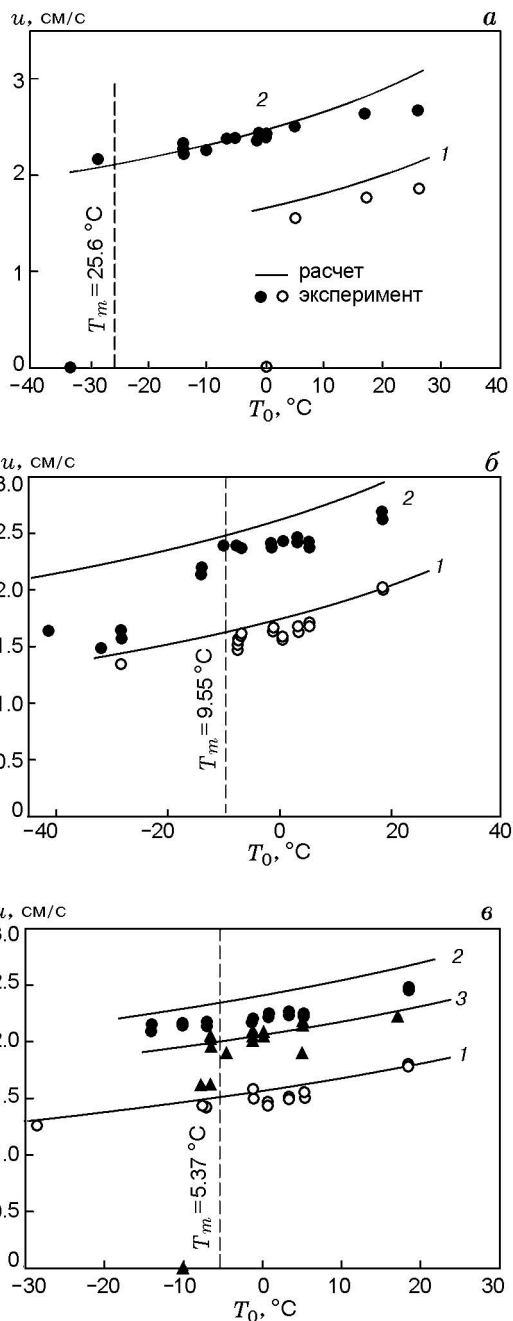


Рис. 2. Зависимость скорости пламени от начальной температуры:

система: а — пленка  $n$ -ундекана — медная фольга (45 мкм, ширина 40 мм), 1 — одно-, 2 — двухстороннее пламя; б — пленка  $n$ -додекана — медная фольга (32 мкм), 1 — одно-, 2 — двухстороннее пламя; в — пленка  $n$ -тридекана — медная фольга (1, 2 — 32 мкм, 3 — 45 мкм) — пленка, 1 — одно-, 2, 3 — двухстороннее пламя

чества атомов углерода в составе топлива. В данном случае все топлива являются членами одного гомологического ряда предельных нормальных углеводородов.

На рис. 2 представлены зависимости скорости пламени от температуры окружающей среды  $T_0$ . Как будет видно из обсуждения ниже, скорость пламени зависит не столько от  $T_0$ , сколько от разности  $T_v - T_0$ , где  $T_v$  — температура, при которой пары топлива вблизи поверхности образуют стехиометрическую концентрацию в смеси с воздухом. В этих опытах использовались также различные топлива для того, чтобы изменять разность  $T_v - T_0$ .

Результаты исследования влияния толщины пленки на скорость пламени и наличие предела распространения по начальной толщине пленки представлены на рис. 3. Эксперимент проводился следующим образом. На горизонтально расположенную полосу фольги наносился слой топлива определенной толщины, толщину контролировали весовым методом. Через определенный промежуток времени инициировалось распространение пламени. Горизонтальное расположение выбрано для того, чтобы исключить влияние стекания жидкости за время выдержки на равномерность толщины пленки. Из рис. 3 видно, что толщина пленки  $n$ -ундекана линейно зависит от времени. Как и ожидалось, скорость распространения пламени не зависит от толщины пленки топлива, т. е. от

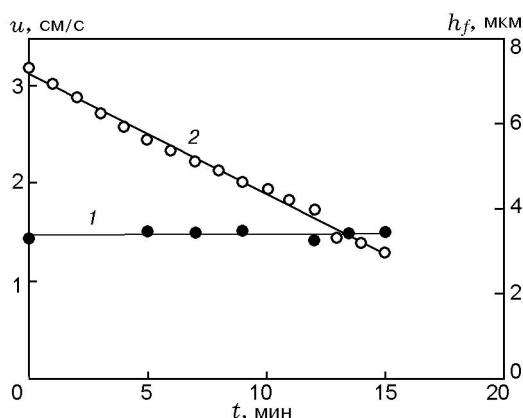


Рис. 3. Зависимость скорости пламени (1) и толщины пленки (2) от промежутка времени между нанесением топлива и инициированием горения:

система: пленка  $n$ -ундекана — медная фольга (45 мкм), распространение горизонтально над верхней стороной фольги

промежутка времени между моментом нанесения жидкой пленки на поверхность фольги и началом распространения пламени, в интервале времени до 15 мин.

Следует отметить, что снижение толщины пленки топлива для конкретной подложки приводит не только к уменьшению затрат тепла на прогрев и испарение топлива, но и при определенной толщине пленки — к пределу распространения пламени. По оценкам для различных топлив нижняя граница первоначальной толщины пленки топлива находится в диапазоне  $h_{f0} = 1.5 \div 3$  мкм.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 видно, что с увеличением количества атомов углерода скорость пламени падает, а температура  $T_v$  растет. По-существу, согласно теоретическим представлениям [4], скорость пламени определяется в результате решения трансцендентного уравнения, в которое в качестве параметра входит разность температур  $T_v - T_0$ .

На рис. 4 представлена схема волны горения в системе «пленка жидкого топлива — подложка» (с обозначением характерных величин, которые используются ниже в обсуждении). При дополнительном условии

$$\frac{c_s \rho_s h_s + c_f \rho_f h_f}{\alpha} \gg \frac{\lambda_s h_s + \lambda_f h_f}{(c_s \rho_s h_s + c_f \rho_f h_f) u^2}$$

характерное время прогрева единицы площади системы «пленка — подложка со стороны газовой фазы» много больше характерного времени тепловой волны, распространяющейся вдоль системы нормально к тепловому потоку из газовой фазы; при  $\frac{\lambda_s}{c_s \rho_s u} \ll L$  характерный размер тепловой волны в твердой фазе много меньше длины пламени; при

$$\frac{\delta}{u} \ll \frac{\lambda_s h_s + \lambda_f h_f}{(c_s \rho_s h_s + c_f \rho_f h_f) u^2}$$

характерное время испарения пленки топлива много меньше характерного времени тепловой волны. Уравнение для скорости волны записано в простом виде [4]

$$u = \sqrt{\frac{\alpha \lambda_s}{c_s \rho_s h_s} \frac{T_b + T_0 - 2T_v}{T_v - T_0}} \times$$

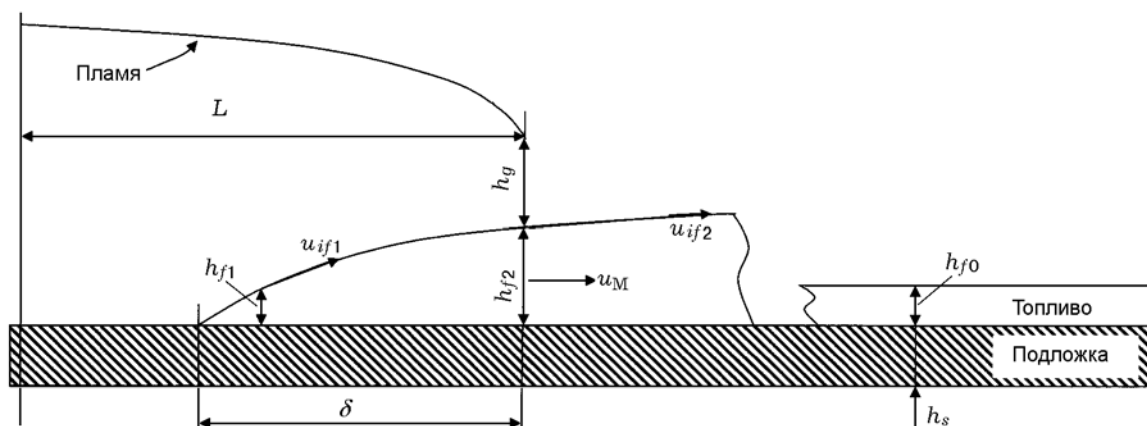


Рис. 4. Схема волны горения в системе «пленка жидкого топлива — подложка»

$$\times \left[ 1 + \frac{q}{c_f(T_v - T_0)} \ln \left( 1 + \frac{c_f \rho_f h_f}{c_s \rho_s h_s} \right) \right]^{-1/2}.$$

Здесь  $\lambda$ ,  $c$ ,  $\rho$ ,  $h$  — теплопроводность, удельная теплоемкость, плотность, толщина (индекс  $s$  относится к материалу фольги,  $f$  — пленки),  $\alpha$  — коэффициент теплообмена между газом и конденсированной фазой,  $L$  — длина факела пламени,  $\delta$  — длина пленки топлива под пламенем,  $T_b$  — температура пламени. Из последней формулы видно, что при фиксированной начальной температуре скорость падает с увеличением разности  $T_v - T_0$  и ростом номера углеводорода  $n$ . При уменьшении разности  $T_v - T_0$  и выборе более летучих топлив или повышении температуры окружающей среды знаменатель в формуле может стремиться к нулю. Очевидно, что расхождение между экспериментом и расчетом растет с уменьшением разности  $T_v - T_0$ . Более того, меняется механизм распространения пламени.

Известно, что над открытой поверхностью горючей жидкости пламя может распространяться со скоростью порядка нормальной скорости пламени в гомогенной газовой смеси паров этой жидкости с воздухом. Это происходит при температурах выше температуры «вспышки», т. е. выше нижнего температурного предела. Это явление связано с образованием горючей смеси над поверхностью еще до распространения пламени. Поскольку в стационарном состоянии образование горючей смеси зависит только от температуры и давления окружающего газа и не зависит от теплофизических характеристик жидкости и подложки, можно ожидать существование такого режима горе-

ния и в нашей системе «жидкость на металлической подложке» при температурах выше температуры вспышки. Действительно, этот режим наблюдался в специальных экспериментах с пленкой этанола на верхней стороне горизонтально расположенной медной фольги шириной 17.5 см и толщиной 60 мкм. Скорость распространения пламени в этом случае  $\approx 70$  см/с. Очевидно, что заложенный в физическую модель механизм распространения пламени с участием теплопроводящей подложки в этом случае не работает. Поскольку по механизму распространения этот режим аналогичен ламинарному пламени, его можно назвать высокоскоростным кондуктивным. Он аналогичен режиму высоких скоростей в пористой среде. В тех же условиях по температуре, но на вертикально расположенной фольге реализуется низкоскоростной кондуктивный режим горения со скоростью пламени, движущегося вниз, 5 см/с. Отсутствие высокоскоростного режима на вертикальной фольге обусловлено особенностями смешения испарившегося вещества с воздухом.

Сравнение результатов экспериментов и расчетов, представленных на рис. 2, показывает, что модель [4] правильно указывает тенденции изменения скорости с температурой. Однако, как правило, теоретические оценки выше результатов эксперимента. Это указывает на то, что в модели [4] упущен какой-то фактор, влияющий на скорость пламени.

Можно предположить, что скорость должна падать с ростом количества тепла, расходуемого на нагрев и испарение единицы площади пленки в системе фольга — пленка. Оценим это количество тепла  $Q$ . Пусть фольга и пленка топлива нагреваются от температуры плав-

Топливо	Теплота, кДж/кг		$T_v, \text{ }^\circ\text{C}$	$T_m, \text{ }^\circ\text{C}$	$Q_1$		$Q_2, \%$	$Q_3, \%$	$Q_4, \%$
	испарения	плавления			Дж/м <sup>2</sup>	%			
C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>	353.6	15.74	39.6	-53.5	14 355	76.5	7.9	4.6	11.0
C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>	339.9	28.71	58.0	-29.65	13 515	72.3	7.5	7.6	12.7
C <sub>11</sub> H <sub>24</sub>	360.7	25.18	73.5	-25.57	15 276	73.8	7.7	5.7	12.8
C <sub>12</sub> H <sub>26</sub>	360.2	36.84	88.0	-9.55	15 042	73.2	7.3	7.3	12.2
C <sub>13</sub> H <sub>28</sub>	359.5	36.16	101.9	-5.37	16 540	74.9	7.5	6.2	11.4

ления  $T_m$  до температуры  $T_v$ , характерной для каждого вещества, а пленка испаряется полностью. Тогда

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 = c_s \rho_s h_s (T_v - T_m) + 2c_f \rho_f h_f (T_v - T_m) + 2h_{f0} \rho_f F + 2h_{f0} \rho_f q. \quad (1)$$

Здесь член  $Q_1$  отвечает за нагрев фольги,  $Q_2$  — за нагрев пленки топлива,  $Q_3$  — за ее плавление,  $Q_4$  — за ее испарение,  $F$  — теплота плавления,  $q$  — теплота испарения топлива. Оценки сделаны для медной фольги толщиной 45 мкм с нанесенной на ее поверхность с двух сторон пленкой топлива толщиной 5 мкм. В таблице представлены результаты расчета этих членов для некоторых предельных углеводородов при  $T_0 = T_m$ , теплофизические данные по топливам взяты из [5]. Из таблицы видно, что во всех случаях  $Q_1 > Q_4 > Q_2 > Q_3$ , т. е. больше всего тепла требуется для нагрева фольги и испарения топлива, затем идут затраты на нагрев топлива и его плавление. При  $T_0 < T_m$  вклад от плавления и испарения топлива уменьшается, а соотношение между затратами на нагрев фольги и топлива сохраняется постоянным.

Исходя из уравнения (1) можно ожидать, что уменьшение толщины пленки топлива, при относительно небольших затратах тепла на ее нагрев и испарение, не должно сильно влиять на скорость распространения пламени. Дополнительные эксперименты с подсушиванием пленки топлива также указывают на независимость скорости пламени от толщины пленки.

На основании полученных экспериментальных данных и оценок по уравнению (1) можно сделать вывод о том, что изменение начальной температуры вблизи температуры плавления не приводит к скачку скорости при переходе через температуру плавления. Скорость с понижением температуры уменьшается плавно.

## ПРИРОДА ПРЕДЕЛА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ

В работе [4] получено выражение для скорости пламени в предположении, что влиянием переноса тепла силами поверхностного натяжения можно пренебречь. Вопросы предела распространения пламени не обсуждались. Вместе с тем из исходных предположений модели [4] понятно, что для стационарного распространения пламени необходимо, чтобы длина факела (размер зоны прогрева подложки продуктами сгорания) была больше определенной величины, зависящей от теплоемкости системы, в противном случае скорость прогрева и испарения будет недостаточной для распространения пламени с соответствующей скоростью. Длина факела входит в теорию [4] как известный параметр. Очевидно, что длина факела зависит от количества топлива, испаряющегося в единицу времени с единицы длины пленки топлива за фронтом пламени. А количество испаряющегося в единицу времени топлива, в свою очередь, зависит от толщины пленки топлива под передней кромкой пламени и от разности скоростей распространения пламени и скорости «убегания» топлива вперед под действием градиента сил поверхностного натяжения, обусловленного градиентом температуры в системе подложка — топливо (эффект Маранго-ни) [4].

Эффективная толщина пленки топлива  $h_{eff}^{st}$ , обеспечивающая необходимый размер факела при стационарном распространении пламени, определяется этой разностью между скоростью распространения пламени  $u$  и скоростью убегания топлива из-под кромки пламени  $u_M$ . Последняя зависит от толщины пленки топлива и градиента температуры [6]:

$$u_M = \frac{h_f}{2\mu} \frac{d\sigma}{dT} \frac{dT}{dx},$$

где  $\sigma$  — коэффициент поверхностного натяжения топлива,  $\mu$  — динамическая вязкость жидкого топлива. Величина  $\frac{dT}{dx}$  под кромкой пламени может быть выражена через стационарную скорость распространения пламени и температуропроводность  $\varkappa$  системы «подложка — жидкое топливо» [3]:

$$\frac{dT}{dx} = (T_v - T_0) \frac{u}{\varkappa}.$$

Величина  $\sigma_T = \frac{d\sigma}{dT}$  в исследуемом диапазоне температур примерно одинакова для всех исследуемых топлив и равна  $0.87 \cdot 10^{-4}$  Н/(м · К) [5]. Эффективная толщина пленки топлива  $h_{eff}$  определяется из следующего уравнения баланса массы в системе отсчета, связанной с движущимся пламенем:

$$h_{eff} \rho_f u = h_f \rho_f u \left[ 1 - \frac{h_f \sigma_T (T_v - T_0)}{2\mu \varkappa} \right]. \quad (2)$$

Из уравнения (2) видно, что эффективная толщина пленки топлива при стационарном распространении ( $h_{eff} = h_{eff}^{st}$ ) может быть реализована при двух значениях  $h_f$ . Уравнение (2) относительно толщины пленки  $h_f$  имеет два корня:

$$h_{f1,2} = \frac{\mu \varkappa}{\sigma_T (T_v - T_0)} \left( 1 \pm \sqrt{1 - \frac{2\sigma_T (T_v - T_0)}{\mu \varkappa} h_{eff}^{st}} \right). \quad (3)$$

При положении кромки пламени над пленкой с толщиной  $h_f$ , попадающей в диапазон  $h_{f1} < h_f < h_{f2}$ , ее эффективная толщина, согласно уравнению (2), будет больше  $h_{eff}^{st}$ , длина факела больше, чем обеспечивает пленка с толщиной  $h_{eff}^{st}$ , распространение пламени возможно. При толщине, большей  $h_{f2}$ , поток топлива, поступающего во фронт пламени, меньше, чем необходимо для создания факела определенной длины, из-за убегания пленки вперед ( $h_{eff} < h_{eff}^{st}$ ). При толщине, меньшей  $h_{f1}$ , убегание мало, но эффективной толщины пленки также не хватает для создания достаточного факела ( $h_{eff} < h_{eff}^{st}$ ).

При  $h_{eff}^{st} = 3$  мкм в условиях данных экспериментов  $h_{f1} = 3.5$  и  $h_{f2} = 20.1$  мкм. Возникает вопрос, какая из двух толщин пленки

топлива находится под передней кромкой фронта пламени. В экспериментах толщина наносимой пленки  $h_{f0}$  всегда была меньше  $h_{f2}$ . Чтобы ответить на этот вопрос, рассмотрим устойчивость этих двух положений кромки пламени, а также некоторые дополнительные аргументы.

Положение пламени над пленкой толщиной  $h_{f1}$  является неустойчивым. Действительно, при сдвиге его в сторону меньших толщин пленки уменьшится длина факела, упадет скорость пламени (длина факела является параметром при расчете скорости пламени по [4]), длина факела уменьшится еще больше (согласно качественным результатам решения задачи Бурке — Шумана), снова упадет скорость и т. д. — произойдет гашение пламени. При сдвиге пламени от  $h_{f1}$  в сторону больших толщин пленки возрастет количество испаряющегося топлива, увеличится длина факела, пламя ускорится и т. д., пока не перейдет в положение, где толщина пленки  $h_{f2}$ . Если пламя сдвинется в сторону больших толщин, чем  $h_{f2}$ , то эффективная толщина пленки топлива снизится, длина факела уменьшится, скорость снизится и пламя вернется в исходное положение  $h_{f2}$ . Таким образом, положение кромки пламени над пленкой с толщиной  $h_{f1}$  представляется неустойчивым, а положение над пленкой с толщиной  $h_{f2}$  — устойчивым.

Дополнительные аргументы следующие. Во-первых, во всех экспериментах наблюдалось стекание пленки на вертикально расположенных подложках при распространении пламени сверху вниз, причем достаточно далеко перед фронтом пламени, где стеканием под действием градиента поверхностного натяжения можно пренебречь вследствие низкого градиента температуры при таком удалении. В этом случае скорость стекания верхнего слоя пленки  $u_g$  обусловлена действием силы тяжести и определяется ее толщиной и вязкостью [7]:

$$u_g = \frac{\rho g h_f^2}{2\mu}. \quad (4)$$

Наблюдавшееся стекание указывает на то, что скорость  $u_g$  выше скорости распространения пламени. Подставляя в уравнение (4) вместо  $u_g$  характерную скорость пламени  $u$ , получаем нижнюю оценку утолщения пленки вдали от фронта. При  $u = 1.8$  см/с она равна 77 мкм, что значительно выше начальной толщины пленки  $h_{f0}$ . Это указывает на то, что толщина пленки в процессе распространения пламени может

быть много больше начальной толщины.

Во-вторых, как показано в работе [8], предел существования двумерного стационарного режима течения пленки наступает при толщине пленки порядка  $2h_{f0}$  и скорости течения поверхности пленки порядка  $u$ . В этом случае малые трехмерные возмущения получают возможность усилиться, возникает периодическая струйная структура течения. В экспериментах это всегда наблюдается вблизи фронта пламени, даже на горизонтально расположенных подложках с подсушенной пленкой топлива. Эти оценки указывают на то, что перед кромкой пламени толщина пленки выше первоначальной.

Еще одним аргументом в пользу предположения относительно положения передней кромки пламени над пленкой толщиной  $h_{f2}$  служит то, что измеренная под кромкой пламени температура конденсированной фазы равна  $T_v$  [3, 9]. При такой температуре давление насыщенных паров топлива вблизи поверхности пленки не должно быть выше стехиометрической концентрации. Вместе с тем известно [10], что как при горении в пограничном слое (как и в рассматриваемом нами случае), так и для стабилизации диффузионного пламени на краю горелки необходим сегмент пламени предварительно перемешанной смеси. Этот сегмент имеет следующую структуру. Топливо и окислитель, смешиваясь вниз по потоку сразу же за срезом горелки, образуют смесь со стратифицированным составом в диапазоне от бедного до богатого предела. В результате пламя этой перемешанной смеси также имеет неодинаковую интенсивность горения вдоль своей поверхности, образуя продукты горения, содержащие соответственно окислитель со стороны бедного и топливо со стороны богатого сегмента пламени. Эти продукты, содержащие кислород и топливо, в свою очередь, образуют диффузионное пламя увеличивающейся интенсивности, переходящее затем в обычное диффузионное пламя. Такая структура пламени называется «тройное пламя» (triple flame или tribrachial flame) [10]. То есть на кончике пламени всегда сгорает стехиометрическая смесь. Возникает вопрос, каким образом создается стехиометрическая концентрация паров топлива на расстоянии  $h_g \approx 1$  мм от передней кромки пламени до конденсированной фазы ( $h_g \gg h_{f1,2}$ ) [11, 12]. По-видимому, стехиометрическая концентрация паров топлива на кон-

чике пламени достигается за счет конвекции и диффузии в газовой фазе продольно и перпендикулярно поверхности подложки из областей с более высокой температурой. Действительно, скорость движения пленки топлива на границе раздела с газом  $u_{if1,2}$  в два раза выше средней скорости убегания (на поверхности твердой фазы она равна нулю):

$$u_{if} = 2u_m = \frac{h_f \sigma_T (T_v - T_0)}{\mu \varepsilon} u. \quad (5)$$

Для рассмотренного выше примера с ундеканом при скорости пламени  $u = 1.8$  см/с,  $u_{if2} = 3.1$  см/с,  $u_{if1} = 0.5$  см/с, где  $u_{if2}$ ,  $u_{if1}$  — скорости поверхности пленки при ее толщине  $h_{f2}$  и  $h_{f1}$  соответственно. При этом толщина пленки  $h_{fu}$ , выше которой скорость верхнего слоя жидкости становится больше скорости пламени, около 12 мкм. Из того, что скорость газа относительно поверхности пленки равна нулю (условия непроскальзывания), следует, что прилегающий к пленке газ движется быстрее волны горения (пламени) в области, где  $h_{fu} < h_f < h_{f2}$ , и медленнее при  $h_{f1} < h_f < h_{fu}$ . Таким образом, движущаяся поверхность пленки топлива за счет вязкости газа увлекает за собой слои газа, находящиеся в области с высокой температурой и высокой концентрацией топлива, к передней кромке пламени. Этот механизм может обеспечить стехиометрическую концентрацию топлива на кончике пламени в области вблизи  $h_{f2}$ , а не  $h_{f1}$ .

Еще один аргумент — это эксперименты с подсушиванием пленок ундекана и *n*-декана. При исследовании предела распространения пламени всегда возникает вопрос об иницировании процесса распространения. Например, если речь идет о концентрационных пределах распространения пламени в предварительно перемешанной смеси, встает вопрос о достаточности энергии электрической искры для зажигания. В нашем случае иницирование осуществлялось открытым пламенем, т. е. очень мощным источником по сравнению с искрой. Однако оказалось, что иницирование пламени более тонкой пленки затруднено. Следует до зажигания медленно прогревать некоторый участок фольги до тех пор, пока не сформируется характерная структура с валиком жидкости [3, 4], а уже затем воспламенять пары топлива. В противном случае, без формирования валика, горение быстро прекращается после выгорания паров топлива. Это указывает на то, что

необходимо обеспечить движение верхнего слоя топлива с опережающей скоростью, чтобы реализовать стационарное распространение пламени. На тонкой первоначальной пленке такую скорость не обеспечить из-за вязкости жидкого топлива (уравнение (5)).

Рассмотрим подробнее предельные условия распространения пламени. Из уравнения (3) видно, что диапазон толщин топлива  $h_{f1} < h_f < h_{f2}$ , способных обеспечить распространение пламени, не зависит от скорости пламени. Эффективная толщина пленки топлива  $h_{eff}^{st}$ , необходимая для прогрева системы, зависит от ее теплоемкости и степени нагрева  $(T_v - T_0)$ . При заданном значении  $h_{eff}^{st}$ , обусловленном теплоемкостью системы и видом топлива  $(T_v)$ , всегда найдется такая начальная температура  $T_0$ , при которой уравнение (3) не будет иметь действительных корней. Это указывает на то, что в этих условиях пламя не может распространяться, поскольку невозможно обеспечить испарение достаточного количества топлива, вследствие движения вперед из-под кромки пламени в слое пленки топлива. Оценим предельные условия по результатам экспериментов. Приняв, как и в работе [4],  $h_{eff}^{st} = 3$  мкм для пленки *n*-ундекана, нанесенной с двух сторон на подложку из медной фольги толщиной 45 мкм, получаем, что подкоренное выражение в (3) обращается в нуль при  $T_0 = -30$  °С. Это значение  $T_0$  соответствует пределу распространения пламени, как и в эксперименте. Если принять, что предельные условия для *n*-додекана и *n*-тридекана в такой же системе (фольга толщиной 45 мкм, пленка топлива с двух сторон) близки, то оценка пределов дает значения  $-17.4$  и  $-6.5$  °С, а в эксперименте  $-14$  и  $-7.5$  °С соответственно. Следует отметить, что значение  $T_0 = -14$  °С соответствует не прекращению распространения пламени, а переходу в другой, спиноподобный режим распространения [13–15]. Близость оценок к экспериментальным результатам по пределам указывает на реалистичность предложенного механизма предела стационарного распространения.

Итак, предел обусловлен нарушением согласованности различных физических процессов, протекающих в волне горения. Для всех жидких или плавящихся веществ должен существовать предел по разности  $(T_v - T_0)_{max}$ . Это означает, что вещество на подложке, горящее при определенной температуре окружающей

среды  $T_0$ , перестанет гореть при некотором понижении  $T_0$ . Для всех веществ в рассматриваемой системе существует нижний температурный предел распространения пламени, не совпадающий с классическим нижним температурным пределом. Кроме того, при данной температуре  $T_0$  существует также предел распространения пламени по температуре  $T_v$ . Углеводороды с большим количеством атомов углерода, имеющие высокие значения  $T_v$ , также не будут распространять пламя.

### РЕЖИМЫ ГОРЕНИЯ ВБЛИЗИ ПРЕДЕЛОВ

Аналогично работе [11], в которой предел достигался вследствие увеличения скорости обдува, в данной работе при приближении к пределу за счет понижения начальной температуры часто наблюдалось либо гашение, либо переход на другой режим распространения, о чем уже упоминалось выше. Подробнее эти нестационарные режимы изложены в [13–15]. Здесь лишь подчеркнем еще раз, что эти режимы наблюдаются вблизи пределов, и схематически опишем области их реализации.

На рис. 5 показаны характерные зависимости скорости от температуры окружающей среды и обозначены области реализации различных режимов горения. Линии 1 и 2 условно показывают рост скорости пламени с ростом температуры при одно- и двустороннем нанесении топлива. В области температур 3 существует спиновое распространение пламени и стационарный режим, в области 4 — поперечный пульсационный и стационарный режимы. В области температур 5, превышающих классический нижний температурный предел, реализуется стационарный режим и режим высокой скорости по газовой квазигомогенной смеси, наблюдается большой разброс экспериментальных данных по скорости пламени. Между 3 и 5 и между 4 и 5 находятся области стационарного испарительно-диффузионного низкоскоростного распространения пламени. Со стороны низких температур для одностороннего пламени (линия 1) наблюдаются поперечно распространяющиеся фронты пламени со скоростью порядка 100 см/с. Диффузионный фронт не является непрерывным. В отдельных местах он исчезает, и через некоторое время по газовой горючей смеси, образовавшейся над поверхностью жидкой пленки за это время, вновь пробегает ламинарное пламя. Тепловая волна в этом случае также распространяется по фольге



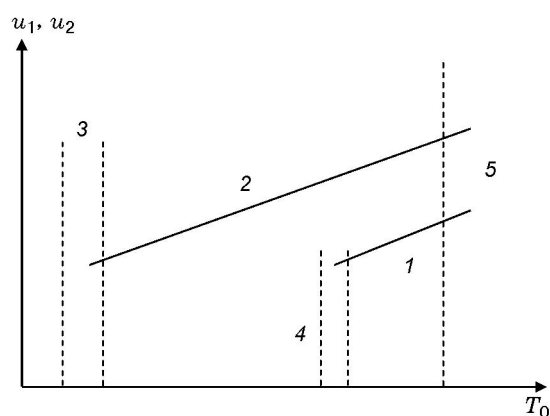


Рис. 5. Качественная зависимость скорости распространения пламени над пленкой жидкого топлива в слоевой системе пленка — фольга (1) и пленка — фольга — пленка (2) от начальной температуры и области температур (3–5), в которых существуют различные режимы:

3 — спиновое распространение пламени и стационарный режим, 4 — поперечный пульсационный режим и стационарный режим, 5 — область температур выше нижнего температурного предела  $T_{low}$ , стационарный режим и режим высокой скорости по газовой квазигомогенной смеси, невоспроизводимость

со стационарной скоростью, но заметно меньшей, чем скорость тепловой волны без поперечных пульсаций. В области температур 4 возможно стационарное распространение как без поперечных пульсаций, так и с ними.

В области температур 3 реализуются три стационарных режима: первый из них — без поперечных пульсаций, второй — с поперечными пульсациями, третий — спиновый режим [13]. Во всех этих режимах тепловая волна вдоль фольги распространяется со стационарной скоростью, только для второго и третьего режимов скорости ниже, чем для первого. При наличии поперечных пульсаций и спина максимальная температура в тепловой волне ниже максимальной температуры в режиме без пульсаций.

На рис. 5 также обозначена область температур, в которой начальная температура выше нижнего температурного предела  $T_{low}$  распространения ламинарного пламени по однородной горючей газовой смеси над поверхностью жидкости. В этой области наблюдается большой разброс экспериментальных данных по скоростям. По-видимому, это связано с невоспроизводимостью условий образования смесей

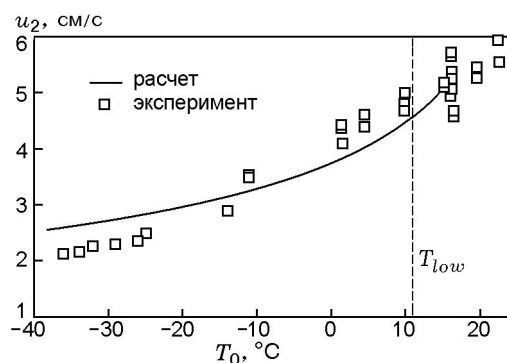


Рис. 6. Зависимость скорости пламени от начальной температуры (система: пленка этанола — медная фольга (45 мкм), двустороннее пламя)

над поверхностью пленки. Для этилового спирта, нанесенного на медную фольгу толщиной 45 мкм, такая невоспроизводимость начинается с температуры  $T_0 = 11$  °С (рис. 6) — значение классического нижнего температурного предела для распространения пламени над поверхностью жидкого этилового спирта.

## ВЫВОДЫ

Существующая модель процесса распространения пламени [4] удовлетворительно описывает зависимость скорости пламени от начальной температуры для различных углеводородов и спиртов, однако требует доработки с целью большей точности прогнозирования скорости пламени.

Не обнаружено сильного влияния фазового перехода топлива в твердое состояние на скорость пламени.

Предел стационарного распространения пламени обусловлен невозможностью обеспечения достаточной толщины испаряющейся пленки из-за эффекта Марангони.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Коржавин А. А., Бунев В. А., Бабкин В. С. Распространение пламени в пористых средах, смоченных топливом // Физика горения и взрыва. — 1997. — Т. 33, № 3. — С. 76–85.
2. Коржавин А. А., Бунев В. А., Бабкин В. С. О существовании режима низкоскоростного распространения пламени в инертной пористой среде, смоченной углеводородным топливом // Докл. АН. — 1994. — Т. 337, № 3. — С. 342–344.

3. 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.
4. Намятов И. Г., Минаев С. С., Бабкин В. С., Бунев В. А., Коржавин А. А. Диффузионное горение над пленкой жидкого топлива на металлических подложках // Физика горения и взрыва. — 2000. — Т. 36, № 5. — С. 12–21.
5. Варгафтик Н. Б. Справочник по физическим свойствам газов и жидкостей. — М.: Наука, 1972.
6. Дерягин Б. В., Чураев Н. В. Смачивающие пленки. — М.: Наука, 1984.
7. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Гидродинамика. — М.: Наука, 1988.
8. Шарыпов О. В., Медведко К. А., Фомин А. В. О пределах существования двумерной стационарной структуры пленки жидкости при распространении волны горения // Физика горения и взрыва. — 2002. — Т. 38, № 1. — С. 24–29.
9. 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.
10. Law C. K. Combustion Physics. — Cambridge Univ. Press, 2006.
11. Коржавин А. А., Какуткина Н. А., Намятов И. Г. Распространение пламени над пленками топлива при встречном потоке газа // Физика горения и взрыва. — 2010. — Т. 46, № 3. — С. 37–43.
12. Коржавин А. А., Намятов И. Г., Бунев В. А., Бабкин В. С. Взаимодействие двух диффузионных пламен, распространяющихся вдоль металлической подложки, смоченной различными топливами // Физика горения и взрыва. — 2003. — Т. 39, № 6. — С. 28–37.
13. Коржавин А. А., Бунев В. А., Намятов И. Г., Бабкин В. С. Спиновый режим газофазного горения конденсированного топлива // Докл. РАН. — 2000. — Т. 375, № 3. — С. 355–357.
14. Korzhavin A. A., Bunev V. A., Namyatov I. G., Minaev S. S., Babkin V. S. 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.
15. Бабкин В. С., Коржавин А. А. Термически тонкая система для изучения поверхностных диффузионных пламен // Инж.-физ. журн. — 2010. — Т. 83, № 6. — С. 1202–1211.

*Поступила в редакцию 15/XI 2011 г.*