

УДК 536.46

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПЛАМЕНИ НАД ПЛЕНКОЙ ЖИДКОГО ТОПЛИВА НА ПОДЛОЖКЕ С НИЗКОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬЮ

И. Г. Намятов, А. А. Коржавин

Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН, 630090 Новосибирск
ign@kinetics.nsc.ru

Исследовалось распространение пламени над поверхностью жидкого топлива, нанесенного на подложку с низкой теплопроводностью. Показано, что такая система — топливо и подложка — не является термически тонкой. Выполнен анализ переноса тепла перед кромкой пламени, обусловленного движением жидкости и возникающего за счет градиента температуры в слое жидкости (эффект Марангони). Приведены оценки градиентов температуры в конденсированной фазе, толщины слоя жидкого топлива перед и под фронтом пламени. Сделана оценка скорости диффузионного потока топлива в газовой фазе вблизи кромки пламени. Показано, что от градиента температуры вдоль поверхности жидкой пленки зависят скорость движения пленки и скорость диффузии испарившегося топлива к кромке пламени.

Ключевые слова: диффузионное пламя, жидкое топливо, эффект Марангони.

DOI 10.15372/FGV20210403

ВВЕДЕНИЕ

За прошедшие несколько десятков лет в области изучения горения над поверхностью горючих материалов выполнено много экспериментальных и теоретических работ. Эксперименты в основном проводились на образцах некоторых практически важных материалов типа древесины [1, 2], бумаги [3], полимеров [4, 5], полиметилметакрилата (ПММА) [6–8] либо в ваннах (pool) с горючей жидкостью [9, 10].

Для этих систем выполнено много экспериментальных исследований и предложены различные модели явления [11–22]. Однако до сих пор остаются невыясненными многие принципиальные для построения модели вопросы. К числу таких относится выбор основного механизма теплопередачи при распространении пламени над поверхностью жидкости. В экспериментах, поставленных для выяснения доминирующего механизма теплопередачи, получены противоречивые результаты. Измерения тепловых потоков с помощью голографической интерферометрии показали, что в любом режиме при распространении пламени по поверхности ПММА доминирует теплопередача по газовой фазе [6, 7]. Однако установлено [5, 8], что теплопроводностью по конденсированной фазе также пренебрегать нельзя.

В работе [15] впервые предложено разделить изучаемые системы на термически толстые и термически тонкие. Эти предельные случаи математически описываются по-разному. В дальнейшем многие исследователи стали применять термины «термически тонкий» и «термически толстый» для слоя топлива. Однако критерии применимости этих терминов приведены не у всех. Анализ этих критериев применительно к процессу распространения пламени сделан в [19] и [23]. Критерий термической тонкости выражается следующим образом: характерное время тепловой релаксации слоя топлива в направлении, перпендикулярном направлению распространения пламени ($\tau_{\perp} = h^2/\kappa_{\perp}$), должно быть меньше характерного времени передачи тепла вдоль подложки ($\tau_{\uparrow} = \kappa_{\uparrow}/u^2$) в направлении распространения пламени. Здесь h — толщина слоя топлива, κ — теплопроводность, u — скорость волны горения.

Анализ на соответствие критерию термической тонкости применительно к конкретным экспериментальным условиям, как правило, не проводился. Наш анализ исследовавшихся веществ показал, что ПММА и бумага, независимо от их толщины, не относятся к термически тонким. Например, из экспериментальных данных [19] следует, что во всем диапазоне толщин слой топлива не является термически тонким, $0.9 < \tau_{\perp}/\tau_{\uparrow} < 10^3$, т. е. соотношение для ха-

рактерных времен в большей части диапазона обратное.

В ранних работах показано, что скорость распространения пламени зависит как от кинетических характеристик газофазной реакции, так и от теплофизических и геометрических характеристик конденсированной фазы. Раздельно изменять эти характеристики за счет замены горючего материала затруднительно. Поэтому с целью расширения методологических возможностей и, в частности, раздельного изучения влияния теплофизических свойств системы и реакционной способности топлив была выбрана новая модельная система — пленка жидкого топлива на тонкой металлической подложке. Подбором толщины металлической подложки легко создать систему, удовлетворяющую условиям термической тонкости. Подобные системы можно рассматривать как в некоторой степени модельные для изучения распространения пламени над поверхностью различных горючих материалов (дерево, пластик и т. п.). Распространение пламени над естественными (природными) материалами осложняется тем, что газофазная реакция горения обычно сопровождается различными физико-химическими процессами, связанными с преобразованиями горючего материала, такими как пиролиз, газификация, фазовые переходы, гетерогенные реакции и др. Варьирование отдельных параметров горючей системы в исследовательских целях при сохранении постоянными других параметров практически невозможно.

Цель исследования горения жидких топлив на подложках заключалась в следующем: варьируя независимо друг от друга теплофизические и геометрические свойства подложки, не участвующей в химической реакции, (теплопроводность, удельная теплоемкость, плотность, толщина) и свойства жидких топлив (коэффициент поверхностного натяжения и его зависимость от температуры, вязкость, теплота испарения, температура кипения, химическая природа), выявить режимы распространения пламени в модельной системе «пленка жидкого топлива на металлической подложке» и ответственный за осуществление конкретного режима ограниченный набор параметров подложки и топлива.

Поставленная цель достигалась варьированием параметров подложки, топлива, геометрии образцов и их ориентации относительно вектора ускорения свободного падения. В ре-

зультате экспериментальных исследований выделен ряд стационарных и нестационарных режимов.

Среди них, основываясь на механизме распространения, можно выделить свободно-конвективный и низкоскоростной режимы распространения пламени. В свободно-конвективном режиме пламя распространяется снизу вверх. Всплывающие продукты сгорания прогревают пленку топлива, она испаряется и сгорает, образуя новую порцию продуктов сгорания. Скорость распространения пламени в этом случае зависит от угла наклона подложки к горизонту, слабо зависит от свойств нанесенного топлива (предельные углеводороды с числом атомов от 10 до 16, $C_{10}H_{22} \div C_{16}H_{34}$) и достигает максимальных значений порядка 30 см/с при вертикальном расположении подложки [24, 25].

В низкоскоростном режиме скорость пламени над топливом на термически тонких подложках составляет порядка 2 см/с. Для системы подложка с высокой теплопроводностью и пленка топлива на ней показано, что основой механизма распространения пламени является передача тепла вперед через подложку от продуктов сгорания в холодную предпламенную зону с пленкой топлива. В работе [26] предложена математическая модель такого механизма распространения пламени. Там же экспериментально показано, что для медных подложек потоком тепла под действием капиллярных сил, вызванных градиентом температуры вдоль подложки (эффект Марангони), можно пренебречь.

В работе [27] теоретически исследовалось диффузионное горение над пленкой жидкого топлива на высокотеплопроводной подложке в рамках модели Бурке — Шумана. Рассчитаны длина и форма пламени, результаты теоретических расчетов хорошо согласуются с экспериментальными данными. В работе [28] эксперименты с тонкой медной подложкой проводились при встречном потоке воздуха либо воздуха, обогащенного метаном, что позволяло увеличивать скорость распространения пламени и сдвигать наступление предела по скорости потока окислителя. В качестве топлив использовались предельные углеводороды с числом атомов углерода больше 9. Были получены новые экспериментальные свидетельства работоспособности предложенной в [26] оценки скорости распространения пламени в термиче-

ски тонкой системе. Также впервые экспериментально показано, что скорость пламени не зависит от скорости встречного потока воздуха или метановоздушной смеси. Однако предложенная в [28] гипотеза предела распространения пламени в такой системе согласуется с экспериментом только в случае учета течения пленки топлива. В работе [29] показано, что скорость распространения пламени не зависит от толщины пленки топлива, когда она больше 3 мкм. Установлено, что плавление пленки топлива не оказывает влияния на скорость распространения пламени. В этой работе [29], посвященной в основном влиянию начальной температуры на скорость распространения пламени над пленкой жидкого топлива на металлических подложках, также показано, что предложенная в [26] модель для расчета скорости пламени удовлетворительно согласуется с экспериментом, но предел распространения пламени обусловлен невозможностью обеспечить достаточную толщину испаряющейся пленки топлива из-за эффекта Марангони. Таким образом, различные эксперименты указывают на то, что в некоторых условиях эффект Марангони может оказывать существенное влияние на распространение пламени в термически тонких системах.

Цель данной работы — на основе экспериментальных данных по распространению пламени над пленкой жидкого топлива в условиях низкой теплопроводности подложки выявить определяющие параметры процесса распространения пламени.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Эксперименты с жидким топливом проводились на тонких подложках из полиэтилентерефталата (лавсана), слюды и над толстым (5 мм) слоем ПММА. В данных экспериментах, в отличие от экспериментов на металлических подложках с пленкой топлива, топливо перед пламенем не может прогреваться за счет теплопередачи по подложке, имеющей такую же низкую теплопроводность ($0.001 \text{ см}^2/\text{с}$ для лавсана, 0.025 параллельно и $0.0028 \text{ см}^2/\text{с}$ перпендикулярно плоскости для слюды [30], $0.001 \text{ см}^2/\text{с}$ для ПММА), как и сама горючая жидкость ($0.0008 \text{ см}^2/\text{с}$). Характерные скорости распространения пламени u при комнатной температуре над пленкой *n*-бутанола, нанесенной на подложку из

слюды при толщине подложки $h_s = 12 \text{ мкм}$, составляют $u = 3.1 \div 3.3 \text{ см/с}$ для пламени, распространяющегося с одной стороны подложки, и $u = 5.6 \text{ см/с}$ для пламени, распространяющегося с двух сторон. При толщине подложки $h_s = 24 \text{ мкм}$ скорость пламени равна $u = 1.9 \text{ см/с}$ в случае одностороннего пламени и $u = 3.5 \text{ см/с}$ для двухстороннего. При использовании в качестве топлива 2-бутанола характерная скорость распространения пламени на тонких подложках из полиэтилентерефталата (лавсана) составляет около 2.6 см/с со стандартным отклонением $\pm 0.4 \text{ см/с}$. На толстой подложке ПММА $u = 1.7 \text{ см/с}$.

Эксперимент с тонкими подложками заключался в следующем. На подложку наносилась пленка топлива, и инициировалось пламя открытым огнем. В качестве подложки использовалась полоса полиэтилентерефталата шириной 10 см, длиной $50 \div 100 \text{ см}$, толщиной 50 мкм. Топливо — спирты: *n*-бутанол, 2-бутанол. Подложка ориентировалась в пространстве вертикально, горизонтально или под некоторым углом к вектору силы тяжести. В результате распространения пламени на вертикальной подложке сверху вниз полиэтилентерефталат плавился и горел. Поэтому топливо наносилось не по всей ширине подложки, а полосой шириной $5 \div 6 \text{ см}$, края шириной $2.5 \div 2 \text{ см}$ оставались сухими и не плавились при горении, тем самым поддерживая подложку в пространстве.

Были поставлены два вида экспериментов. В первой постановке в жидкое топливо добавлялся флуоресцентный краситель родамин 6G, пленка жидкости подсвечивалась светом полупроводникового лазера с длиной волны 532 нм, соответствующей поглощению этого красителя. Проводилась видеосъемка процесса распространения пламени, по результатам видеосъемки вычислялась скорость пламени. Увеличение интенсивности флуоресценции соответствовало увеличению толщины пленки жидкости за счет движения жидкости. Эта зона увеличенной флуоресценции наблюдалась непосредственно перед и под передним краем пламени, и ее ширина составляла $\delta = 1 \text{ мм}$. За передним краем пламени наблюдалась испаряющаяся пленка топлива длиной около 1 см вдоль координаты распространения пламени. Эти эксперименты выполнялись на вертикальной подложке при распространении пламени сверху вниз.

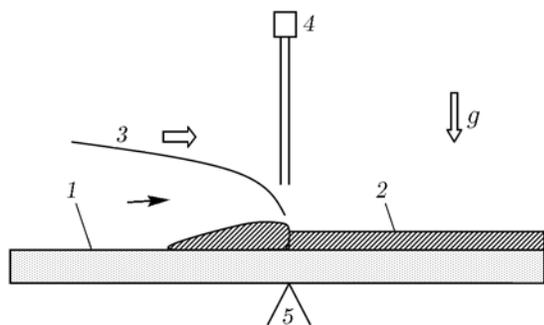


Рис. 1. Схема распространения пламени:

1 — подложка, 2 — пленка топлива, 3 — фронт пламени, 4 — фотодиод в узком канале, 5 — термопара

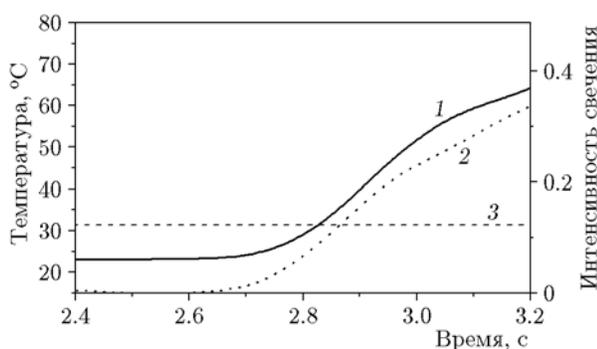


Рис. 2. Зависимость температуры подложки (1) и интенсивности свечения пламени (2) от времени:

3 — температура T_v , соответствующая стехиометрической концентрации паров топлива; скорость пламени 2.1 см/с

Схема проведения второго вида экспериментов аналогична представленной в [31] и показана на рис. 1. На одном конце узкой трубки крепился фотодиод, а второй открытый конец трубки располагался на высоте 1 см от поверхности подложки точно напротив термопары, находящейся на обратной стороне подложки. Подложка ориентировалась горизонтально. Одновременно измерялись температура подложки и самосвечение пламени. Измерения проводились термопарой медь — константан толщиной 100 мкм.

Характерный вид зависимости температуры от времени при прохождении пламени показан на рис. 2 — линия 1, а самосвечения — линия 2. В этом случае использовалось топливо 2-бутанол, скорость пламени составляла 2.1 см/с.

ОБСУЖДЕНИЕ

На основе полученных экспериментальных данных проведем оценки характерных скоростей процессов, сопровождающих распространение пламени над пленкой топлива на подложке.

Сначала оценим характерное время процессов теплопередачи. Характерное время прогрева пленки топлива первоначальной толщины $h_f = 10$ мкм $\tau_f = h_f^2/k_f \approx 0.001$ с. Характерное время прогрева подложки $\tau_s = h_s^2/k_s \approx 0.025$ с. Характерное время пребывания топлива в зоне повышенной толщины пленки жидкости перед фронтом пламени $\tau_\delta = \delta/u \approx 0.05$ с. Видно, что за это время пленка топлива первоначальной толщины может прогреться, а нагрев подложки будет запаздывать. То есть пленка топлива будет иметь одинаковую температуру в направлении, нормальном к поверхности подложки, а подложка нет. Однако вследствие того, что подложка достаточно тонкая, ее теплоемкость мала и подложка также прогревается. Но в целом система подложка — топливо не является термически тонкой.

Эксперименты на вертикальной подложке с добавлением красителя показали заметные отличия в поведении пленки жидкого топлива на низкотеплопроводной подложке по сравнению с медной подложкой. Размер области с повышенной толщиной жидкой пленки перед кромкой фронта пламени $\delta \approx 0.1$ см значительно меньше по сравнению с аналогичной областью на высокотеплопроводной подложке, где она составляет 1 ÷ 1.5 см [31]. Кроме того, на низкотеплопроводных вертикальных подложках при распространении пламени сверху вниз отсутствует вытекание топлива из этой области перед фронтом пламени, характерное для распространения над высокотеплопроводной подложкой [31]. Длина испаряющегося участка топлива под фронтом пламени около 1 см, что того же порядка, как и на высокотеплопроводных подложках, где эта величина равна 0.1 ÷ 1 см в зависимости от вида топлива [31].

На металлических подложках величина области подогрева подложки перед фронтом пламени δ_m определяется температуропроводностью κ системы подложка — топливо [31] и скоростью пламени u :

$$\delta_m = \kappa/u,$$

$$\kappa = \frac{\lambda_s h_s + \lambda_f h_f}{c_s \rho_s h_s + c_f \rho_f h_f} \approx \frac{\lambda_s h_s}{c_s \rho_s h_s + c_f \rho_f h_f}.$$

Здесь λ , c , ρ , h — теплопроводность, удельная теплоемкость, плотность и толщина слоя, индексы s , f относятся к подложке и топливу соответственно. Так, например, для подложки из стали и меди $\kappa_s \approx 0.2$ и $1 \text{ см}^2/\text{с}$ соответственно, в то время как для бумажных и полимерных образцов $\kappa_s \approx 10^{-3} \text{ см}^2/\text{с}$. Поэтому для систем с металлическими подложками могут быть характерны широкие зоны подогрева. Действительно, для изученных образцов численная оценка дает значения $\kappa/u \approx 0.1 \div 1 \text{ см}$, что согласуется с экспериментом. Аналогичные оценки возможных зон подогрева при кондуктивной теплопередаче по твердой и жидкой фазам для изучаемой системы при $u = 2 \text{ см/с}$ дают значения $\kappa/u \sim 10^{-3}$ и 10^{-4} см соответственно. Однако наблюдаемый размер δ гораздо больше, порядка 0.1 см , близко к значениям на металлических подложках.

Рассмотрим, чем обусловлено увеличение толщины пленки топлива перед кромкой пламени. Будем считать, согласно [26, 32], что под передней кромкой пламени температура жидкого топлива T_v равна температуре, при которой достигается давление паров, создающее стехиометрическую смесь с воздухом. Здесь $T_v = 304.44 \text{ К} = 31.3 \text{ }^\circ\text{С}$ — температура, при которой равновесное давление паров 2-бутанола в воздухе создает стехиометрическую смесь с объемной долей 0.0338. Зависимость давления паров от температуры для 2-бутанола взята из [33] в виде $\lg p = A - B/(T + C)$, где $A = 4.546$, $B = 1351.55$, $C = 93.34$, давление здесь представлено в барах, а температура — в кельвинах.

Если бы пленка топлива была твердой, а не жидкостью, то, пренебрегая теплообменом с газовой фазой, в зоне подогрева, как и на металлических подложках, можно было бы ожидать, как в [32], следующую зависимость температуры от координаты x вдоль направления распространения пламени:

$$T = (T_v - T_0) \exp(ux/\kappa).$$

Градиент температуры при $x = 0$, вблизи кромки пламени, $\frac{dT}{dx} = (T_v - T_0) \frac{u}{\kappa_f} = 3.3 \cdot 10^4 \text{ К/см}$.

Но так как у нас пленка не твердая, а жидкость, то такой градиент вызвал бы движение жидкости [26] со средней скоростью

$$v = \frac{h_f}{2\mu} \sigma_T \frac{dT}{dx} \approx 0.35 \text{ м/с}. \quad (1)$$

Зависимость коэффициента поверхностного натяжения σ от температуры в этом температурном диапазоне линейная, $\sigma_T = \frac{d\sigma}{dT} = 0.85 \cdot 10^{-4} \text{ Н/(м} \cdot \text{К)}$ [33], зависимость динамической вязкости жидкого топлива μ от температуры нелинейная и изменяется от $3 \cdot 10^{-3}$ до $0.54 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$ в диапазоне температур $20 \div 100 \text{ }^\circ\text{С}$. Это движение привело бы к переносу тепла за счет движения жидкости вперед, к снижению градиента температуры и скорости движения пленки топлива. По-видимому, таким образом формируется градиент температуры, обеспечивающий стационарное движение валика жидкого топлива перед кромкой пламени.

Движение пленки перед кромкой пламени вызывает ее утолщение. Рассмотрим, какова может быть толщина пленки топлива перед кромкой пламени на вертикально расположенной подложке. Отсутствие вытекания жидкого топлива из утолщения указывает на то, что средняя скорость стекания пленки топлива w_m ниже скорости движения пламени. Для слоя жидкости, отстоящего на расстояние y от вертикальной подложки, скорость w будет постоянна при равенстве сил тяжести и трения:

$$\rho g + \mu \frac{d^2 w}{dy^2} = 0,$$

граничными условиями для этого уравнения будут $w = 0$ при $y = 0$ и $\frac{dw}{dy} = 0$ при $y = h_f$. Решением этого уравнения является зависимость скорости течения пленки топлива от координаты $w = \frac{\rho g}{\mu} y \left(h_f - \frac{y}{2} \right)$. После осреднения по толщине пленки топлива получается зависимость $w_m = \frac{\rho g h_f^2}{\mu 3}$. Таким образом, вытекание возможно, если толщина пленки топлива в утолщении будет больше $\sqrt{\frac{3\mu u}{\rho g}} = 0.155 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 155 \text{ мкм}$. Это верхняя оценка толщины пленки топлива вблизи кромки пламени. Градиент температуры перед кромкой пламени можно оценить как $\frac{dT}{dx} = \frac{T_v - T_0}{\delta} \approx 153 \text{ К/см}$. При такой толщине пленка топлива должна двигаться под действием капиллярных сил (уравнение (1)) со средней скоростью

$$v = \frac{\sigma_T h_f dT}{2\mu dx} \approx 0.046 \text{ м/с},$$

Это значение скорости выше экспериментального значения $u = 0.021 \text{ м/с}$. То есть при такой толщине пленка топлива вытекала бы из-под кромки пламени. Это указывает на то, что толщина пленки под пламенем меньше 155 мкм.

Таким образом, из экспериментов с красителем на вертикальных подложках следует, что толщина сгорающей в единицу времени пленки равна первоначальной h_{f0} (отсутствует вытекание), а толщина пленки под кромкой пламени лежит в интервале $h_{f0} < h_f < 155 \text{ мкм}$.

Рассмотрим рис. 2 подробнее. В отличие от [31], здесь не наблюдается опережения сигнала термопары относительно сигнала фотодиода, что может быть обусловлено двумя причинами. Первая — это инерционность термопары. Вторая причина заключается в том, что система подложка — топливо обладает низкой температуропроводностью и поэтому температура, определенная по сигналу термопары на обратной от пламени стороне подложки, в данный момент времени ниже, чем на поверхности топлива. Обе причины занижают температуру на нижней стороне подложки по сравнению с верхней стороной.

Тем не менее проведем оценки градиента температуры и скорости движения жидкости вблизи кромки пламени на основе экспериментальных данных, представленных на рис. 2. Очевидно, что под фронтом пламени жидкость прогревается посредством теплопроводности газа. За счет того, что порция жидкости под пламенем, дальше отстоящая от его передней кромки, прогревается дольше, она приобретает более высокую температуру, чем та порция, которая только что вошла под пламя. Это создает градиент температуры в жидкости вдоль направления движения пламени. Таким образом, за счет эффекта Марангони жидкость с высокой температурой поверхности и прилегающий к ней газ с высокой плотностью паров жидкости перемещаются по направлению движения пламени в холодную область. Из данных, представленных на рис. 2, можно вычислить градиент температуры при $T_v = 31.3 \text{ }^\circ\text{C}$. Экспериментальные данные по зависимости температуры от времени вблизи T_v аппроксимировались полиномом второй степени, от него брали производную по времени и делили на скорость распространения пламени. По-

лученный таким образом градиент температуры составляет 65 К/см, что более чем в два раза ниже оценки градиента перед кромкой пламени — 153 К/см. Это неудивительно, так как сигнал термопары с обратной стороны подложки запаздывает по сравнению с верхней поверхностью топлива.

В [29] показано, что скорость течения верхнего слоя жидкого топлива всегда выше скорости распространения пламени. Отсутствие вытекания топлива из «валика» указывает на то, что эффективная толщина сгорающей пленки топлива h_{eff} равна первоначальной толщине $h_{eff} = h_{f0} = 10 \text{ мкм}$, а толщину пленки под кромкой пламени можно оценить через градиент температуры вблизи T_v . Согласно [29] выражение для h_{eff} имеет вид

$$h_{eff} \rho_f u = h_f \rho_f u - \frac{h_f^2 \rho_f \sigma_T dT}{2\mu dx}. \quad (2)$$

Здесь первый член в правой части выражает массу топлива на единицу площади сечения пленки, втекающего под кромку пламени, движущегося со скоростью u , а второй член — количество топлива, убегающего из-под фронта пламени вперед, в более холодную область. Из (2) следует, что толщина пленки топлива под кромкой пламени может иметь два значения. В [29] показано, что стационарное распространение пламени возможно только при большем значении h_f :

$$h_f = \mu u \left/ \left(\sigma_T \frac{dT}{dx} \right) \right. \times \\ \times \left[1 + \sqrt{1 - h_{f0} \left(2\sigma_T \frac{dT}{dx} \right) / (\mu u)} \right] \approx \\ \approx 6 \cdot 10^{-5} \text{ м} = 60 \text{ мкм}.$$

В данном расчете принят градиент температуры 153 К/см, при градиенте 65 К/см толщина пленки была бы 156 мкм и, согласно проведенным выше оценкам, пленка вытекала бы из утолщения.

При градиенте температуры 153 К/см пленка толщиной 60 мкм двигалась бы под действием капиллярных сил со средней скоростью (уравнение (1))

$$v = \frac{\sigma_T h_f dT}{2\mu dx} \approx 0.018 \text{ м/с}.$$

А при градиенте температуры 65 К/см пленка толщиной 156 мкм двигалась бы под действием капиллярных сил со средней скоростью 0.02 м/с. Эти оценки дают значения, близкие к скорости пламени. При этом скорость пленки на поверхности будет в два раза выше.

Представленные выше оценки характерного времени прогрева топлива проведены для начальной толщины пленки топлива. Если же под ведущей кромкой пламени толщину пленки принять равной 60 мкм, то характерное время прогрева, например для $h_f = 60$ мкм, будет $\tau_f = 0.045$ с. Эта величина того же порядка, что и $\tau_\delta = 0.05$ с. То есть слой жидкого топлива при такой толщине не является термически тонким.

Оценим скорость v диффузионного потока топлива в газовой фазе вблизи кромки пламени, где температура топлива равна T_v . Диффузия происходит вдоль направления распространения пламени и в перпендикулярном направлении. Нас интересует скорость диффузии к кромке пламени вдоль направления распространения:

$$v = \frac{D}{\rho_g} \frac{\partial c_f}{\partial x}. \quad (3)$$

Здесь ρ_g — плотность газовой смеси, а градиент концентрации топлива можно представить в виде

$$\begin{aligned} \frac{\partial c_f}{\partial x} &= \frac{\partial \rho_f}{\partial x} = \frac{M}{R} \frac{\partial(p/T)}{\partial x} = \\ &= \frac{M}{R} \left[\frac{\partial p}{T \partial x} - \frac{p}{T^2} \frac{\partial T}{\partial x} \right] = \\ &= \frac{Mp}{RT} \left[\ln(10) \frac{B}{(T+C)^2} - \frac{1}{T} \right] \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (4) \end{aligned}$$

M — молекулярная масса топлива, R — универсальная газовая постоянная. Подставляя в уравнение (4) численные значения соответствующих величин, получаем

$$\frac{\partial c_f}{\partial x} = 8.6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^4$$

при градиенте температуры 65 К/см. Подставляя вычисленное значение градиента концентрации в уравнение (3), принимая $D = 0.085 \cdot 10^{-4}$ м²/с при 300 К [33], $\rho_g = 1$ кг/м³, получаем оценку скорости диффузии $v = 0.073$ м/с при градиенте температуры 65 К/см

и $v = 0.17$ м/с при градиенте температуры 153 К/см. Следует учесть, что это оценка скорости диффузии относительно движущейся пленки топлива, сам верхний слой пленки топлива также движется к кромке пламени со скоростью, превышающей среднюю скорость пленки в два раза.

ВЫВОДЫ

Скорость распространения пламени определяется градиентом температуры жидкости вблизи передней кромки пламени.

Величина градиента температуры определяется не только теплофизическими свойствами топлива и подложки и их толщиной, а в основном зависимостью коэффициента поверхностного натяжения от температуры и динамической вязкостью жидкого топлива. Роль подложки сводится к теплопотерям, которые определяются ее теплоемкостью и толщиной. Таким образом, определяющим механизмом передачи тепла по конденсированной фазе является движение жидкости за счет эффекта Маранго-ни.

От градиента температуры вдоль поверхности жидкой пленки зависят скорость движения пленки и скорость диффузии испарившегося топлива к кромке пламени.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Simms D. L.** Ignition of cellulosic materials by radiation // *Combust. Flame.* — 1960. — V. 4, N 4. — P. 293–300.
2. **Kosdon F. J., Williams F. A., Buman C.** Combustion of vertical cellulosic cylinders in air // 12th Symp. (Int.) on Combustion. — 1969. — P. 253–264.
3. **Sibulkin M., Ketelhut W., Feldman S.** Effect of orientation and external flow velocity on flame spreading over thermally thin paper strips // *Combust. Sci. Technol.* — 1974. — V. 9. — P. 75–77.
4. **Ефремов В. Л., Колесников Б. Я.** Исследование распределения температуры при распространении пламени по поверхности отвержденной эпоксидной смолы // Горение конденсированных и гетерогенных систем: материалы VI Всесоюз. симпоз. по горению и взрыву / под ред. А. Г. Мержанова. — Черногловка, 1980. — С. 38–41.
5. **Crescitelli S., Pota F., Santo G., Tufano V.** Influence of solid phase thermal properties on flame spread over polymers // *Combust. Sci. Technol.* — 1981. — V. 27. — P. 75–78.

6. **Ito A., Kashiwagi T.** Temperature measurements in PMMA during downward flame spread in air using holographic interferometry // 21st Symp. (Int.) on Combustion. — 1986. — P. 67–74.
7. **Ito A., Kashiwagi T.** Characterization of flame spread over PMMA using holographic interferometry sample orientation effects // Combust. Flame. — 1988. — V. 71. — P. 189–204.
8. **Fernandez-Pello A., Williams F. A.** Laminar flame spread over PMMA surfaces // 15th Symp. (Int.) on Combustion. — 1975. — P. 217–231.
9. **Sirignano W. A., Glassman I.** Flame spreading above liquid fuels: Surface-tension-driven flows // Combust. Sci. Technol. — 1970. — V. 1. — P. 307–312.
10. **Ito A., Konishi T., Narummi A., et al.** The measurement of transient 2-D profiles of velocity and fuel concentration over liquids // Proc. of the ASME Heat Transfer Division. — 1997. — V. 2.
11. **Tashtoush G., Narumi A., Ito A., Saito K., Cremers C.** Simulations of the heat transfer mechanism of flame spread over liquids // Proc. of the 1998 Technical Meeting of the Central States Section of the Combustion Institute. — P. 196–200.
12. **Thomas P. H.** The size of flames from natural fires // 9th Symp. (Int.) on Combustion. — 1963. — P. 844–859.
13. **Albini F. A.** A physical model for firespread in brush // 11th Symp. (Int.) on Combustion. — 1967. — P. 553–560.
14. **McAlevy R. F., Magee R. S.** The mechanism of flame spreading over the surface of igniting condensed-phase materials // Symp. (Int.) Combust. — 1969. — V. 12, N 1. — P. 215–227.
15. **De Ris J. N.** Spread of a laminar diffusion flame // Symp. (Int.) Combust. — 1969. — V. 12, N 1. — P. 241–252.
16. **Sirignano W. A.** A critical discussion of theories of flame spread across solid and liquid fuels // Combust. Sci. Technol. — 1972. — V. 6. — P. 95–105.
17. **Orloff L., De Ris J., Markstein G. H.** Upward turbulent fire spread and burning of fuel surface // 15th Symp. (Int.) on Combustion. — 1975. — P. 183–192.
18. **Fernandez-Pello A., Williams F. A.** Experimental techniques in the study of laminar flame spread over solid combustibles // Combust. Sci. Technol. — 1976. — V. 14. — P. 155–167.
19. **Fernandez-Pello A., Williams F. A.** A theory of laminar flame spread over flat surfaces of solid combustibles // Combust. Flame. — 1977. — V. 28. — P. 251–277.
20. **Williams F. A.** Mechanisms of fire spread // 16th Symp. (Int.) on Combustion. — 1977. — P. 1281–1294.
21. **Feng C. C., Sirignano W. A.** Further calculations based upon a theory of flame spread across solid fuels // Combust. Flame. — 1977. — V. 29. — P. 247–263.
22. **Wichman I. S.** Theory of opposed-flow flame spread // Prog. Energy Combust. Sci. — 1992. — V. 18. — P. 553–593.
23. **Рыбанин С. С., Соболев С. Л., Стесик Л. Н.** К теории распространения ламинарного диффузионного пламени по поверхности горючего материала // Горение конденсированных и гетерогенных систем: материалы VI Всесоюз. симпоз. по горению и взрыву / под ред. А. Г. Мержанова. — Черноголовка, 1980. — С. 32–38.
24. **Коржавин А. А., Вьюн А. В., Какуткина Н. А., Намятов И. Г., Бабкин В. С.** Свободно-конвективный режим распространения пламени над пленкой топлива на подложке // Физика горения и взрыва. — 2007. — Т. 43, № 5. — С. 21–30.
25. **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 3rd Int. 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.
26. **Намятов И. Г., Минаев С. С., Бабкин В. С., Бунев В. А., Коржавин А. А.** Диффузионное горение пленки жидкого топлива на металлической подложке // Физика горения и взрыва. — 2000. — Т. 36, № 5. — С. 12–21.
27. **Коржавин А. А., Намятов И. Г.** О форме пламени при диффузионном горении пленки жидкого топлива на подложке // Физика горения и взрыва. — 2015. — Т. 51, № 5. — С. 3–12. — DOI: 10.15372/FGV20150501.
28. **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.
29. **Коржавин А. А., Бунев В. А., Бабкин В. С., Намятов И. Г.** Влияние начальной температуры на скорость распространения пламени над пленкой жидкого топлива на металлических подложках // Физика горения и взрыва. — 2012. — Т. 48, № 5. — С. 87–96.
30. **Gray A. S., Uher C.** Thermal conductivity of mica at low temperatures // J. Mater. Sci. — 1977. — V. 12. — P. 959–965.

-
31. 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, N 3. — С. 25–30.
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, N 3. — С. 15–18.
33. NIST Chemistry WebBook. — <https://webbook.nist.gov/chemistry/>.

*Поступила в редакцию 16.07.2020.
Принята к публикации 28.10.2020.*
