

## СВОБОДНО-КОНВЕКТИВНЫЙ РЕЖИМ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ НАД ПЛЕНКОЙ ТОПЛИВА НА ПОДЛОЖКЕ

А. А. Коржавин<sup>1</sup>, А. В. Вьюн<sup>2</sup>, Н. А. Какуткина<sup>1</sup>, И. Г. Намятов<sup>1</sup>,  
В. С. Бабкин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт химической кинетики и горения СО РАН, 630090 Новосибирск, korzh@kinetics.nsc.ru

<sup>2</sup>Сибирская государственная геодезическая академия, 630108 Новосибирск

Экспериментально исследованы закономерности распространения пламени по пленке жидкого топлива на тонкой металлической подложке в условиях свободной конвекции. Мгновенные значения скорости пламени коррелируют с длиной факела. Средняя скорость пламени растет от 2 до 30 ÷ 40 см/с при вариации угла наклона подложки к горизонту в диапазоне 0 ÷ 90°. Для подложки заданной ширины скорость пламени обратно пропорциональна теплоемкости единицы площади системы подложка — топливо и разности между температурой, соответствующей образованию стехиометрической смеси насыщенных паров данного топлива с воздухом, и температурой окружающей среды.

Ключевые слова: горение, диффузионное горение, режимы горения, конвекция, пленка топлива.

### ВВЕДЕНИЕ

Проблеме распространения пламени над поверхностью горючих материалов в окислительной газовой среде посвящено большое количество экспериментальных и теоретических работ [1–18]. Интерес к этой проблеме обусловлен ее очевидной связью с проблемой распространения пожаров.

Распространение пламени по поверхности топлива является сложным физико-химическим процессом. Его экспериментальные исследования затруднены тем обстоятельством, что вариация теплофизических параметров системы, как правило, возможна только с одновременным изменением характеристик горючести топлива. Поэтому установление в чистом виде параметрических зависимостей для скорости горения часто оказывается невозможным. Другим осложняющим фактором является то, что в процессе распространения волны горения конденсированное топливо может претерпевать ряд изменений, таких как пиролиз, газификация, испарение, которые трудно адекватно учесть в упрощенных моделях.

В работе [15] предложен новый подход, позволяющий упростить задачу. Суть его состоит в рассмотрении термически тонкой би-

нарной слоевой системы «пленка жидкого топлива на металлической подложке». Пламена в такой системе сохраняют основные черты пламен, распространяющихся по поверхности топлива. В то же время данная система позволяет независимо варьировать ее теплофизические свойства и реакционную способность топлива при изучении процесса распространения пламени. Еще одно преимущество такой системы заключается в том, что в достаточно широком диапазоне толщин металлических подложек эта система является термически тонкой [12, 15–17], что значительно упрощает теоретический анализ процесса горения.

Предшествующими исследованиями [18] показано, что характер горения в такой системе зависит от направления распространения пламени относительно вектора гравитации. В процессе распространения пламени важную роль играет механизм передачи тепла из зоны горячих продуктов сгорания в предпламенную зону. Топливо в предпламенной зоне может подогреваться непосредственно конвективным или радиационным теплообменом с пламенем, либо опосредованно — теплопроводностью по металлической подложке, прогреваемой продуктами сгорания. В соответствии с этими механизмами выделяются два предельных режима распространения пламени — конвективный и кондуктивный [18]. Кондуктивный режим реализуется, когда шлейф пламени направлен в сторону подложки с уже испарившимся топ-

Работа выполнена при частичной поддержке междисциплинарного гранта Сибирского отделения РАН (№ 111, 2006 г.).

ливом, а конвективный — когда шлейф пламени располагается непосредственно над пленкой топлива на подложке. При отсутствии вынужденного потока газа кондуктивному режиму соответствует случай, когда вертикальная составляющая скорости волны горения направлена вдоль вектора силы тяжести, т. е. при распространении сверху вниз. Напротив, при распространении пламени снизу вверх реализуется свободно-конвективный режим.

Кондуктивный режим горения в системе «жидкая пленка на металлической подложке» подробно исследован экспериментально и теоретически [15–18]. Для него установлены определяющие параметры и параметрические зависимости для скорости горения, изучены структурные характеристики волн горения, предложены простые математические модели и проведено их сопоставление с экспериментальными результатами [13, 14, 17]. Конвективный режим горения в такой системе наблюдался в [18], но его характерные закономерности практически были не изучены. В то же время, вероятно, именно этот режим во многих случаях является доминирующим при пожарах. Настоящая работа посвящена экспериментальному изучению закономерностей и особенностей процесса распространения диффузионного пламени по пленке жидкого углеводородного топлива, нанесенной на термически тонкую металлическую подложку в условиях существенного влияния свободной конвекции.

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперименты проводились на воздухе при атмосферном давлении и комнатной температуре на установке, аналогичной описанной в [17]. Использовались подложки, представляющие собой полосы плоской фольги различной ширины и толщины. Подложка закреплялась на концах. Плоскость ее ориентации задавалась определенными углами относительно вектора силы тяжести и горизонтальной плоскости. На подложку наносилась пленка топлива с одной или двух сторон. Зажигание производилось открытым пламенем или электрической спиралью в нижней части полосы.

Полоса фольги постоянной ширины представляет собой часть плоскости с продольной осью симметрии, поэтому ее ориентацию относительно вектора ускорения силы тяжести  $g$  можно описать двумя углами: углом  $\alpha$  между

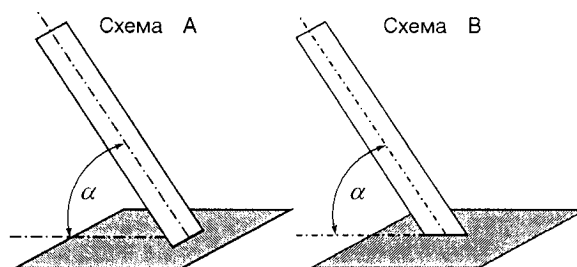


Рис. 1. Схемы ориентации подложек в пространстве

осью симметрии и горизонтальной плоскостью и углом  $\beta$  между горизонтальной плоскостью и плоскостью фольги.

Эксперименты проводились по двум схемам ориентации плоскости образца в пространстве (рис. 1). По схеме А плоскость фольги образовывала угол  $\alpha$  с горизонтальной плоскостью и, таким образом, ось симметрии образца была перпендикулярна линии пересечения плоскости образца с горизонтальной плоскостью. По схеме В  $\beta = 90^\circ$ , т. е. плоскость образца вертикальна, а ось симметрии расположена под углом  $\alpha$  к горизонтальной плоскости.

Угол  $\alpha$  варьировался от 0 до  $90^\circ$ . При этом по схеме А пламя могло распространяться по верхней или нижней поверхности фольги или по обеим сразу. Распространение пламени по разным поверхностям в этой конфигурации не эквивалентно. По схеме В плоскость фольги располагается вертикально. При этом не имеет значения, на какой из двух поверхностей полоса находится топливо, так как из соображений симметрии они эквивалентны.

Подложки изготавливались из полос медной фольги толщиной  $h_s = 45$  и  $60$  мкм, шириной  $w = 1 \div 350$  мм и длиной  $0.3 \div 5$  м. Толщина подложек измерялась микрометром, а также рассчитывалась по массе фольги известной площади. Точность измерения толщины фольги весовым методом 1 %.

В качестве топлив использовался ряд нормальных алканов ( $C_nH_{2n+2}$ ):  $n$ -декан ( $n = 10$ ),  $n$ -ундекан ( $n = 11$ ),  $n$ -додекан ( $n = 12$ ),  $n$ -тридекан ( $n = 13$ ),  $n$ -гексадекан ( $n = 16$ ). При комнатной и более низкой температуре эти вещества являются жидкостями либо твердыми веществами. Толщина пленки топлива определялась по массе жидкости, нанесенной на фольгу известной площади, с точностью 10 % [16]. Характерные величины толщины

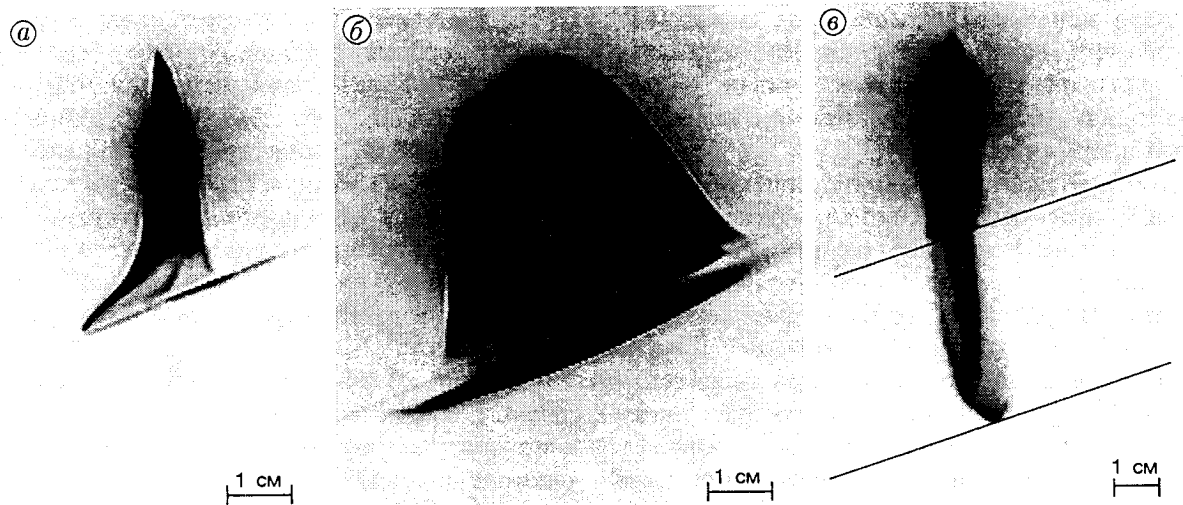


Рис. 2. Видеокadres распространения пламени додекана снизу вверх по верхней (а) и нижней (б) поверхностям подложки при  $\alpha = 22.6^\circ$  и по боковой поверхности (в) при  $\alpha = 20^\circ$ : ширина подложки  $w = 4$  см, толщина  $h_s = 45$  мкм

пленки составляли  $7 \div 10$  мкм.

Исследования показали, что испарение декана влияет на толщину топливной пленки при комнатной температуре. Время испарения пленки декана на половину толщины приблизительно равно 5 мин. Поэтому эксперименты с использованием декана проводились в течение 2 мин. Влияние испарения на толщину пленки ундекана и более высших углеводов за время эксперимента несущественно.

Скорость распространения пламени определяли по времени прохождения фронтом пламени участка известной длины. Длина участка измерения составляла  $30 \div 500$  см.

Кроме измерения скорости проводились фотографирование пламени, видеосъемка видимой картины и измерение текущей температуры подложки термопарами медь — константан. Медным компонентом являлась сама подложка, к которой методом точечной сварки приваривалась константановая проволока толщиной 50 мкм.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

При любом угле  $\alpha \neq 0$  возможны две моды распространения пламени — снизу вверх и сверху вниз. В максимальной степени свободноконвективный режим реализуется при распространении пламени снизу вверх по вертикальной полосе фольги. При уменьшении угла наклона  $\alpha$  влияние свободной конвекции на про-

цесс распространения пламени ослабевает. Таким образом, варьируя угол  $\alpha$ , можно менять вклад свободной конвекции. С целью установления определяющих параметров и параметрических зависимостей процесса варьировались углы ориентации, ширина и толщина подложки, вид топлива.

В схеме А при заданном угле  $\alpha$  характер распространения пламени и его скорость  $u$  зависят от того, на какой поверхности фольги (верхней или нижней) находится пленка топлива. На рис. 2,а представлен видеокادر (негатив) распространения пламени по пленке топлива на верхней поверхности фольги при  $\alpha = 22.6^\circ$ . Ниже нижнего края пламени находится сухая фольга с испарившимся топливом. Форма пламени указывает на влияние свободной конвекции на его формирование, вытянутость пламени обусловлена восходящими потоками нагретого газа.

На рис. 2,б представлен видеокادر распространения пламени по пленке топлива, нанесенной на нижнюю поверхность фольги, ориентированной также под углом  $\alpha = 22.6^\circ$ . Сопоставляя масштабы рис. 2,а и рис. 2,б, легко видеть, что при распространении по нижней поверхности площадь пленки, прогреваемой пламенем, больше. При этом выше и скорость пламени. Свободная конвекция также оказывает влияние на форму пламени. Однако если при распространении по верхней поверхности фольги

свободная конвекция способствует вытягиванию пламени вверх, то при распространении по нижней стороне конвекция обеспечивает растекание горячих газов под подложкой и вынос их за края подложки.

При вертикальной ориентации плоскости фольги асимметрия распространения пламени по разным поверхностям фольги снимается. Пламя представляет собой вытянутый вверх шлейф (рис. 2, в), под проекцией которого на подложку находится испаряющаяся пленка топлива. Площадь этой проекции относительно предыдущих случаев меньше, соответственно и ниже скорость пламени. Длина шлейфа пламени зависит от вида топлива, ширины и толщины подложки.

При визуальных наблюдениях за процессом распространения пламени можно отметить следующие особенности. Распространение пламени, строго говоря, не является стационарным, скорость пламени и высота факела постоянно флуктуируют. Предельным проявлением таких флуктуаций является гашение пламени, которое иногда наблюдается в процессе распространения. Стандартное отклонение скорости пламени  $\sigma_u$  для изученных топлив зависит от угла наклона подложки  $\alpha$  и соответственно от диапазона скоростей пламени. Максимальные значения  $\sigma_u = 0.17 \div 0.27$  наблюдаются при  $\alpha = 40 \div 85^\circ$ . При  $\alpha < 40^\circ$  и  $\alpha > 85^\circ$  величины  $\sigma_u$  уменьшаются до  $0.08 \div 0.18$ .

Второй особенностью является течение жидкого топлива по подложке. На подложке под пламенем образуется валик жидкого топлива, толщина которого зависит от угла наклона образца. Толщина валика может значительно превышать толщину исходной пленки жидкости. Валик появляется через небольшой промежуток времени с момента инициирования горения и движется снизу вверх по подложке вместе с волной горения. По мере распространения толщина валика растет, и начиная с некоторой толщины валик теряет устойчивость. Это проявляется в том, что жидкость из валика стекает вниз в виде отдельных струй, количество которых зависит от ширины подложки. Подобные явления формирования струйных течений наблюдались ранее [19–21] при гравитационном стекании пленки жидкости в поле температурного градиента. Механизм и критические условия потери устойчивости валика жидкости и формирования струйных течений в общем случае и, в частности, при горении жидкой плен-

ки на подложке были рассмотрены в [22–24]. Процесс горения, с одной стороны, формирует условия для образования струйных течений, а с другой стороны, образующиеся струйные течения влияют на характеристики горения. На вытекающих из валика струйках топлива могут оставаться отдельные очаги горения, что приводит к формированию неплоского очагового фронта горения. В моменты стекания струек жидкости распространение пламени замедляется.

На рис. 3 представлены типичные зависимости координаты фронта пламени от времени при распространении пламени на вертикальных полосах фольги различной ширины ( $\alpha = 90^\circ$ ). Опыты проводились с медной фольгой толщиной 60 мкм, в качестве топлива использовался *n*-додекан. Пленка топлива наносилась на одну поверхность фольги. Под координатой фронта при распространении пламени снизу вверх понимается нижняя граница пламени. Из рис. 3 видно, что зависимости координаты фронта пламени от времени  $x(t)$  могут быть достаточно точно аппроксимированы прямыми линиями, что позволяет считать процесс распространения пламени квазистационарным. Вместе с тем на траекториях, представленных на рис. 3, видны флуктуации скорости, что обусловлено свободноконвективным характером движения горячего газа и описанным выше эффектом течения топлива. Особенно заметно это проявляется на узких полосах фольги ( $w = 1$  см). Видеосъемка процесса горения позволила также опреде-

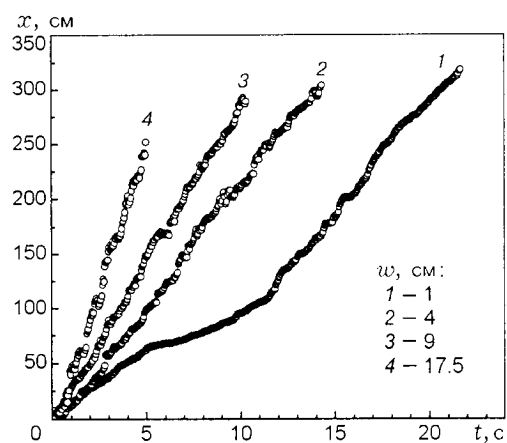


Рис. 3. Зависимость координаты фронта пламени от времени при распространении пламени *n*-додекана над медной подложкой толщиной 60 мкм

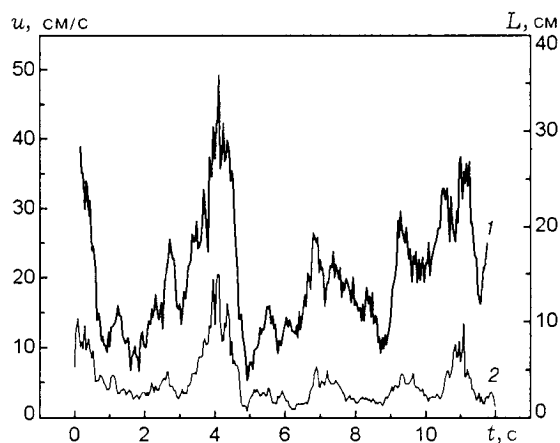


Рис. 4. Корреляция между скоростью пламени (1) и длиной факела (2):

$w = 1$  мм,  $h_s = 45$  мкм,  $\alpha = 90^\circ$ , топливо — додекан

лечь изменение длины пламени в процессе распространения. Длина пламени  $L$  измерялась как расстояние от нижней границы пламени до верхней. На рис. 4 представлены результаты одновременного измерения локальной скорости пламени и длины факела. Явно прослеживается корреляция между этими величинами. Обработка данных рис. 4 дает зависимость вида  $u \sim L^{0.5}$ .

Среднюю скорость пламени  $\langle u \rangle$  можно определить как по параметрам прямой линии  $x(t)$ , проведенной по экспериментальным точкам методом наименьших квадратов, так и по времени прохождения участка фольги известной длины. Вычисленные двумя способами средние значения скорости отличаются не более чем на 5 %.

На рис. 5 представлены зависимости средней скорости пламени от угла наклона полосы фольги  $\alpha$  для трех различных конфигураций — распространение по верхней (2) и нижней (3) поверхностям фольги при расположении ее по схеме А и распространение по одной стороне фольги по схеме В (1). Наибольшая скорость горения при одном и том же угле  $\alpha$  реализуется при распространении пламени по нижней поверхности фольги: так, в диапазоне  $\alpha = 20 \div 40^\circ$  скорость распространения по нижней стороне в 2–3 раза превышает скорость распространения по верхней стороне фольги. Причина этого в специфике влияния свободной конвекции на теплообмен горячих продуктов сгорания с подложкой. При распространении пламени по нижней стороне конвекция прижимает горячие

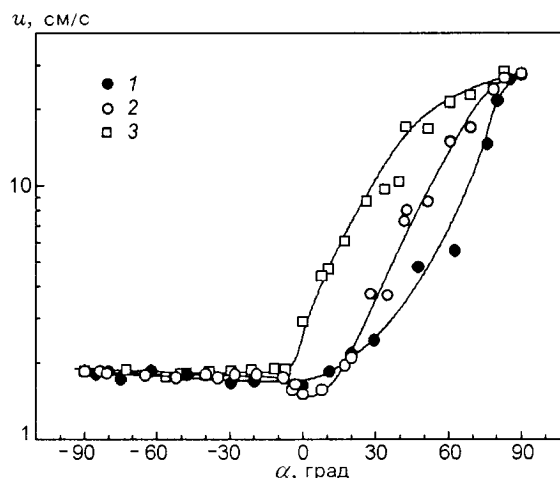


Рис. 5. Зависимость скорости пламени ундекана, распространяющегося с одной стороны подложки, от угла  $\alpha$ :

1 — схема В; 2 — схема А, пламя распространяется по верхней поверхности подложки; 3 — схема А, пламя распространяется по нижней поверхности подложки; отрицательным углом соответствует распространение пламени сверху вниз, положительным — снизу вверх

газы к поверхности фольги, способствуя ее эффективному прогреву (см. рис. 2, б). При распространении по верхней стороне, напротив, конвекция уносит горячие продукты горения от поверхности фольги (см. рис. 2, а). Наименьшие значения скорости при данном угле  $\alpha$  наблюдаются при вертикальной ориентации плоскости фольги, что обусловлено, вероятно, минимальной площадью контакта фольги с продуктами сгорания (см. рис. 2, в). При всех трех конфигурациях системы скорость растет при увеличении угла  $\alpha$  (рис. 5), поскольку это приводит к увеличению площади контакта пленки топлива с горячими газами. При  $\alpha = 90^\circ$  конвекция переносит горячие газы вдоль плоскости фольги. При этом тепло продуктов горения наиболее эффективно используется для прогрева фольги, топлива и его испарения. Поэтому на вертикальной полосе фольги достигаются максимальные скорости горения. Для сравнения на рис. 5 приведены значения скорости, измеренные при распространении пламени сверху вниз (область отрицательных углов). В этом случае пламя прогревает в основном сухую подложку. В результате свободноконвективное движение газа вдоль подложки хотя и увеличивает максимальную температуру подложки с приближением к вертикальному

случаю распространения [15], но не меняет скорость пламени, так как в кондуктивном режиме скорость определяется переносом тепла по подложке в окрестности передней кромки пламени. Поэтому изменение  $\alpha$  в таком режиме не приводит к изменению скорости горения [17].

На рис. 6 приведены типичные профили температуры подложки в волне горения. Увеличение угла наклона фольги приводит к значительному увеличению ширины температур-

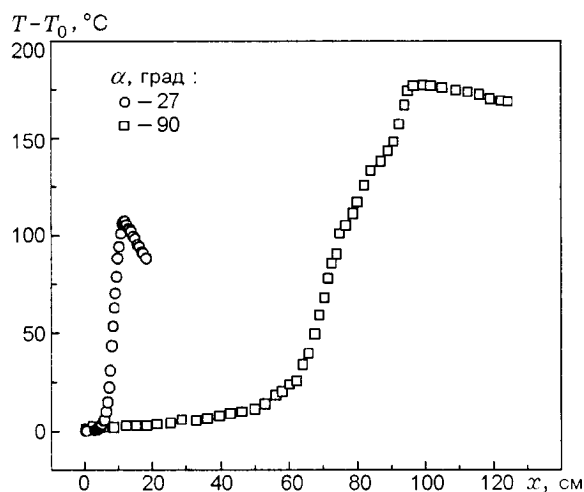


Рис. 6. Типичные профили температуры подложки в волне горения:

пламя распространяется по верхней поверхности подложки,  $w = 4$  см,  $h_s = 45$  мкм, топливо — *n*-декан

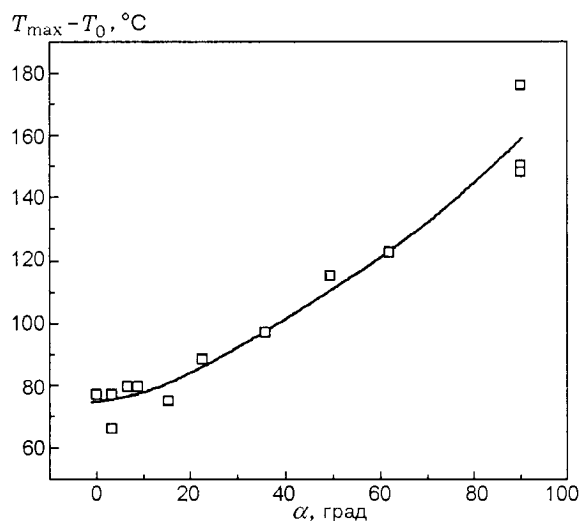


Рис. 7. Зависимости максимальной температуры подложки от угла наклона подложки:

$w = 4$  см,  $h_s = 45$  мкм, топливо — *n*-декан

ного профиля, которая определяется как размер области прироста температуры от  $10^\circ\text{C}$  до максимума. Так, в примерах, приведенных на рис. 6, ширина профиля при  $\alpha = 90^\circ$  почти в 10 раз превышает таковую при  $\alpha = 27^\circ$ . Скорость горения при этом также увеличивается. На рис. 7 показано изменение максимальной температуры подложки при изменении угла  $\alpha$  в случае распространения пламени по верхней поверхности фольги. Увеличение угла наклона приводит к росту температуры подложки. Из рисунка видно, что при  $\alpha = 0$  максимальная температура подложки несколько превышает температуру  $T_v$  для *n*-декана, при которой пары топлива в равновесии с воздухом образуют стехиометрическую топливовоздушную смесь ( $T_v = 58^\circ\text{C}$ ), а при  $\alpha = 90^\circ$  — близка к температуре кипения топлива, равной для *n*-декана  $167^\circ\text{C}$ .

При изменении вида топлива скорость пламени возрастает в последовательности тридекан, додекан, ундекан при всех значениях углов  $\alpha$ . На рис. 8 представлены зависимости  $u(\alpha)$  для различных топлив при распространении по одной боковой поверхности фольги толщиной  $h_s = 45$  мкм. Видно, что по пленкам ундекана пламя распространяется во всем диапазоне углов  $\alpha$ . Для додекана пламя не распространяется при  $\alpha < 11^\circ$ , для тридекана — при  $\alpha < 27.5^\circ$ . При распространении пламени по верхней поверхности фольги предельное зна-

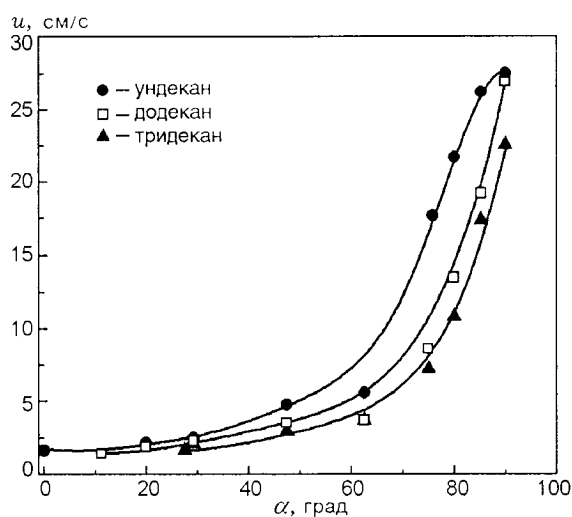


Рис. 8. Зависимости скорости распространения пламени по одной стороне подложки от угла  $\alpha$  для различных топлив:

схема В,  $w = 4$  см,  $h_s = 45$  мкм

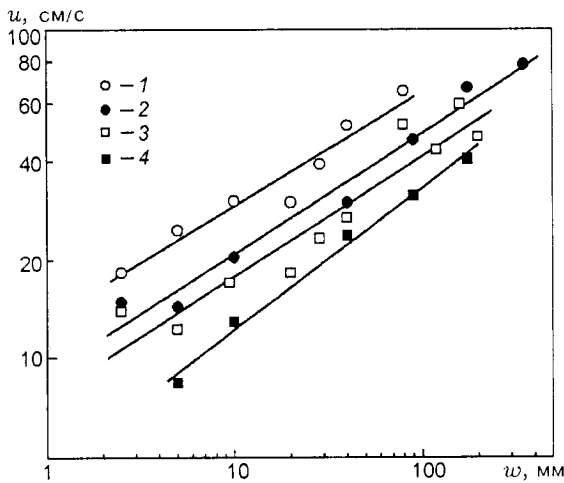


Рис. 9. Зависимости скорости распространения пламени над пленкой *n*-дондекана от ширины и толщины медной подложки:

1 —  $h_s = 45$  мкм, пламя с двух сторон, 2 —  $h_s = 60$  мкм, пламя с двух сторон, 3 —  $h_s = 45$  мкм, пламя с одной стороны, 4 —  $h_s = 60$  мкм, пламя с одной стороны; схема В

чение  $\alpha$  для тридекана уменьшается до  $12.9^\circ$ , а для ундекана и додекана пламя распространяется во всем диапазоне углов  $\alpha$ . При нанесении пленки топлива на нижнюю поверхность фольги предел для тридекана составляет  $7.4^\circ$ , а для ундекана и додекана пределов не обнаружено. Для двухсторонних пламен пределы по  $\alpha$  для этих топлив исчезают для всех конфигураций расположения подложки и топлива.

Рис. 9 иллюстрирует влияние геометрических параметров системы — ширины ( $w$ ) и толщины ( $h_s$ ) подложки для одно- и двухсторонних пламен. При увеличении толщины подложки скорость пламени уменьшается примерно во столько же раз, во сколько увеличивается толщина подложки. Если пленка нанесена на две стороны фольги, пламя распространяется почти в два раза быстрее, чем одностороннее пламя. Зависимость скорости горения от ширины фольги довольно слабая: в исследованном диапазоне параметров скорость меняется примерно пропорционально корню кубическому из ширины подложки  $u \sim w^{1/3}$ .

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные результаты свидетельствуют о важной роли свободной конвекции в процессе распространения пламени снизу вверх. На это

указывает значительное, в несколько раз, увеличение скорости пламени при увеличении угла наклона фольги и корреляция скорости пламени с длиной факела.

Рассмотрим более подробно рис. 5. При любой конфигурации системы горячие продукты горения переносятся свободной конвекцией вертикально вверх. Рост скорости пламени при увеличении  $\alpha$ , по-видимому, обусловлен увеличением продольной (вдоль подложки) составляющей скорости конвективного потока и, как следствие, более эффективным использованием тепла продуктов сгорания для прогрева подложки с пленкой топлива. При распространении пламени по боковой или нижней поверхности подложки увеличение  $\alpha$  приводит к росту скорости пламени начиная с самых малых углов наклона. Однако при распространении по верхней стороне подложки в области малых углов наклона наблюдается уменьшение скорости пламени даже ниже значения, соответствующего низкоскоростному кондуктивному режиму горения. Причиной этой особенности, вероятно, является наблюдаемое в экспериментах течение жидкости по подложке. Образование жидкого валика при распространении волны горения по пленке топлива обусловлено зависимостью поверхностного натяжения жидкости от температуры [25]. В условиях температурного градиента возникает градиент поверхностного натяжения, вызывающий течение жидкого топлива в направлении более низкой температуры. При распространении пламени сверху вниз это приводит к утоньшению пленки в окрестности ведущей кромки пламени, а при распространении снизу вверх, наоборот, к утолщению пленки под пламенем. При увеличении толщины пленки растут теплозатраты на ее нагрев и испарение и, как следствие, это должно приводить к снижению скорости горения [17]. При малых углах наклона влияние свободной конвекции мало. Поэтому механизм распространения главным образом кондуктивный, соответственно и скорость пламени должна быть близка к скорости распространения сверху вниз, но она снижается за счет увеличения толщины пленки под пламенем, что и приводит к ямообразному участку на кривой 2 рис. 5. При достаточно больших углах наклона утолщения пленки практически не происходит из-за низких скоростей течения жидкости по сравнению со скоростью пламени.

Попытаемся обобщить полученные ре-

зультаты по параметрическим зависимостям скорости, сделав упрощающие предположения о процессе горения в рассматриваемой системе. Прежде всего, покажем, что наша система является термически тонкой. В термически тонкой слоевой системе характерные времена тепловой релаксации в слоях топлива  $\tau_f$  и подложки  $\tau_s$  должны быть много меньше характерного времени передачи тепла вдоль подложки  $\tau_b$ . Для исследованных в данной работе систем  $h_f \approx 7$  мкм,  $h_s \approx 45$  и  $60$  мкм,  $\alpha_f \approx 10^{-3}$  см<sup>2</sup>/с,  $\alpha_s \approx 1.12$  см<sup>2</sup>/с,  $u = 1.8 \div 28$  см/с. Эффективный коэффициент температуропроводности слоевой системы определяется по формуле

$$\alpha_* = \frac{\lambda_f h_f + \lambda_s h_s}{c_f \rho_f h_f + c_s \rho_s h_s},$$

где  $\alpha$ ,  $\lambda$ ,  $h$ ,  $c$ ,  $\rho$  — коэффициенты температуропроводности, теплопроводности, толщина, теплоемкость и плотность; индексы  $f$  и  $s$  относятся соответственно к жидкому топливу и подложке. Для исследованного диапазона параметров  $\alpha_* \approx 1$  см<sup>2</sup>/с. Отсюда следует, что  $\tau_b = \alpha_*/u^2 = 1.3 \cdot 10^{-3} \div 0.3$  с,  $\tau_s = h_s^2/\alpha_s = 3.8 \cdot 10^{-5}$  и  $1.8 \cdot 10^{-5}$  с,  $\tau_f = h_f^2/\alpha_f = 4.9 \cdot 10^{-4}$  с. т. е.  $\tau_f$  и  $\tau_s$  много меньше  $\tau_b$ . Следовательно, выбранная система, состоящая из пленки жидкого топлива на металлической фольге, является термически тонкой во всем исследованном диапазоне параметров.

По аналогии с [17] предположим, что кромка пламени находится над участком подложки, нагретым до температуры  $T_v$ , соответствующей образованию в равновесных условиях стехиометрической топливовоздушной смеси. Температуру пламени примем равной адиабатической температуре горения этой смеси. Тепло от пламени к подложке с пленкой топлива передается конвекцией и излучением. В обоих случаях поток тепла  $Q$  от пламени к подложке определяется главным образом разностью температур пламени и подложки. Тепловой баланс в стационарной волне горения в окрестности лидирующей кромки пламени запишем в виде

$$kQ = uq = u(c_s \rho_s h_s (T_v - T_0) + kc_f \rho_f h_f (T_v - T_0) + k\Delta h_f \rho_f q_v), \quad (1)$$

где  $q_v$  — удельная теплота испарения топлива;  $k = 1$  при распространении пламени по одной стороне подложки и  $k = 2$  для двухсторонних

пламен. Первый член в правой части (1) учитывает затраты тепла на нагрев фольги, второй — на нагрев пленки, а третий — на ее испарение. Здесь  $\Delta h_f$  — изменение толщины пленки за счет испарения. Оценки для одностороннего пламени показывают, что для фольги толщиной 45 мкм первый член составляет 81 %, второй — 5 %, а третий — 14 % в общем балансе тепла, даже если считать  $\Delta h_f$  равной исходной толщине пленки. Для фольги толщиной 60 мкм — соответственно 85, 5 и 10 %. Видно, что основная часть потока тепла тратится на нагрев фольги.

Из баланса (1) следует, что скорость распространения пламени с двух сторон подложки должна быть приблизительно такой же, как и при распространении по одной стороне подложки, но в два раза меньшей толщины. На рис. 10 данные рис. 9 представлены в виде зависимости комплекса  $uq/k$  от ширины подложки. Видно, что данные по скорости одно- и двухсторонних пламен на подложках разной толщины хорошо обобщаются в виде комплекса  $uq/k$ . Прямая, проведенная методом наименьших квадратов, дает уравнение  $uq/k = 912w^{0.372}$ . Из этого соотношения следует, что скорость обратно пропорциональна  $q$  и растет с шириной подложки примерно как корень кубический. Влияние ширины подложки на скорость пламени скорее всего обусловлено связью с шириной подложки длины факела, которая, как бы-

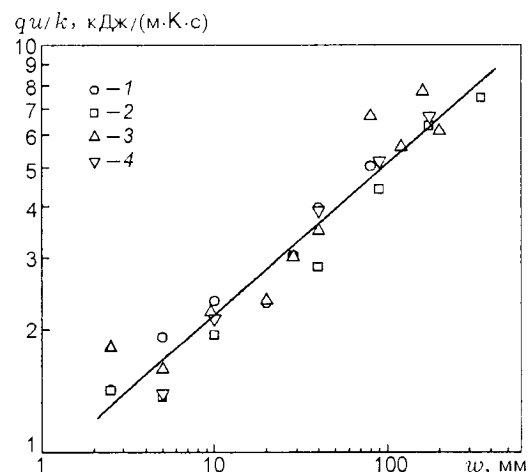


Рис. 10. Зависимости комплекса  $qu/k$  от ширины и толщины медной подложки:

1 —  $h_s = 45$  мкм, пламя с двух сторон, 2 —  $h_s = 60$  мкм, пламя с двух сторон, 3 —  $h_s = 45$  мкм, пламя с одной стороны, 4 —  $h_s = 60$  мкм, пламя с одной стороны



ло показано выше, коррелирует со скоростью. Действительно, покадровая обработка видеосъемки процесса горения показывает, что при прочих равных условиях длина факела растет с шириной подложки в исследованном диапазоне изменения параметров.

Так как вклад в  $q$  члена, ответственного за испарение пленки, мал по сравнению с затратами тепла на прогрев подложки и пленки, то в первом приближении можно считать, что для данного материала скорость пламени обратно пропорциональна теплоемкости системы  $c_s \rho_s h_s + c_f \rho_f h_f$  и разности температур  $T_v - T_0$ . Это подтверждает рис. 11, на котором данные рис. 8 для разных топлив представлены в виде зависимости комплекса  $u(T_v - T_0)$  от  $\alpha$ . Видно, что в этих координатах данные для различных топлив укладываются на одну кривую. Связь скорости горения с теплоемкостью конденсированной фазы указывает на родственность этого процесса с фильтрационным горением газа [26]. В то же время при горении пленки топлива на металлических подложках реализуются достаточно большие скорости волны горения, достигающие при  $\alpha = 90^\circ$  величины нормальной скорости горения стехиометрической паровоздушной смеси соответствующего топлива, что не характерно для процесса фильтрационного горения. Вероятно, это обусловлено, с одной стороны, низкой теплоемкостью на единицу длины термически тонкой системы, что дает значения скорости порядка 2 см/с при  $\alpha \approx 0$ , а с другой стороны — конвективно-турбулентным ха-

рактером пламени при больших значениях  $\alpha$ , обеспечивающим интенсивный прогрев и испарение конденсированной фазы.

Обратим внимание на наличие предела по углу наклона. Предельное значение угла наклона увеличивается для более тяжелых топлив, для которых больше значение  $T_v$ . При малых углах наклона продукты горения текут практически перпендикулярно к плоскости подложки и поэтому плохо ее прогревают. Естественно предположить, что наличие предела обусловлено недостатком тепла для прогрева подложки с пленкой топлива до температуры  $T_v$ . В пользу этого предположения свидетельствует также то, что предельные значения  $\alpha$  максимальны для бокового распространения пламени, когда теплообмен продуктов горения с подложкой наименее эффективен, и минимальны для распространения по нижней стороне, когда прогрев подложки наиболее эффективен. Для двухсторонних пламен поток тепла к подложке в два раза больше, чем для одностороннего при той же конфигурации. Поэтому для двухстороннего пламени в данных системах пределов не наблюдалось.

## ВЫВОДЫ

1. Проведенные экспериментальные исследования показали, что в механизме распространения пламени снизу вверх определяющую роль играет свободная конвекция. Об этом свидетельствуют характер зависимости скорости пламени от угла наклона подложки и корреляция скорости горения с размером пламени.

2. Скорость пламени падает с ростом теплоемкости системы и температуры  $T_v$ , при которой пары топлива в равновесии с воздухом образуют стехиометрическую топливовоздушную смесь. Это обусловлено необходимостью прогрева всей системы, ввиду ее термической тонкости, до температур, необходимых для достаточно интенсивного испарения топлива.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Kosdon F. J., Williams F. A., Buman C. Combustion of vertical cellulosic cylinders in air // 12th Symp. (Intern.) on Combustion. 1969. P. 253-264.
2. Ito A., Kashiwagi T. Temperature measurements in PMMA during downward flame spread in air using holographic interferometry // 21st Symp. (Intern.) on Combustion. 1986. P. 67-74.

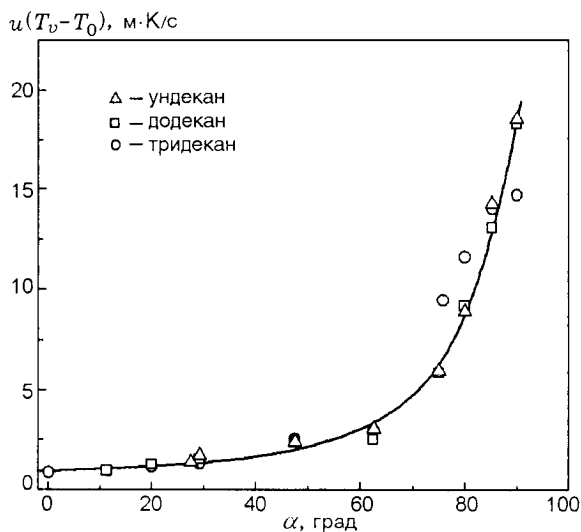


Рис. 11. Зависимость комплекса  $u(T_v - T_0)$  от угла  $\alpha$  для различных топлив

3. **Fernandez-Pello A., Williams F. A.** Laminar flame spread over PMMA surfaces // 15th Symp. (Intern.) on Combustion. 1975. P. 217-231.
4. **Sirignano W. A., Glassman I.** Flame spreading above liquid fuels: Surface-tension-driven flows // Combust. Sci. Technol. 1970. V. 1. P. 307-312.
5. **McAlevy R. F., Magee R. S.** The mechanism of flame spreading over the surface of igniting condensed-phase materials // 12th Symp. (Intern.) on Combustion. 1969. P. 215-226.
6. **De Ris J.** Spread of a laminar diffusion flame // 12th Symp. (Intern.) on Combustion. 1969. P. 241-252.
7. **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.
8. **Orloff L., De Ris J., Markstein G. H.** Upward turbulent fire spread and burning of fuel surface // 15th Symp. (Intern.) on Combustion. 1975. P. 183-192.
9. **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.
10. **Williams F. A.** Mechanisms of fire spread // 16th Symp. (Intern.) on Combustion. 1977. P. 1281-1294.
11. **Wichman I. S.** Theory of opposed-flow flame spread // Prog. Energy Combust. Sci. 1992. V. 18. P. 553-593.
12. **Рыбанин С. С., Соболев С. Л., Стефик Л. Н.** К теории распространения ламинарного диффузионного пламени по поверхности горючего материала // Химическая физика процессов горения и взрыва. Горение конденсированных систем / Под ред. А. Г. Мержанова. Черноголовка, 1980. С. 32-38.
13. **Rybanin S. S.** Theory of a diffusion flame spread over thermally thin fuel/inert sheet // The Third Asia-Pacific Conf. on Combustion. 2001. Seoul, Korea. P. 203-206.
14. **Rybanin S. S.** Effect of solid-phase conduction on limits of flame spread over thermally thin fuel sheet // The Fourth Asia-Pacific Conf. on Combustion, 2003. Nanjing, China. P. 113-116.
15. **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.
16. **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.
17. **Намятов И. Г., Минаев С. С., Бабкин В. С. и др.** Диффузионное горение пленки жидкого топлива на металлической подложке // Физика горения и взрыва. 2000. Т. 36, № 5. С. 12-21.
18. **Korzhavin A. A., Bunev V. A., Namyatov I. G., et al.** Combustion regimes of liquid fuel film on thermally thin metallic substrate // 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, UK, 2001. P. 379-388.
19. **Kabov O. A., Marchuk I. V., Chupin V. M.** Thermal imaging study of the liquid film flowing on vertical surface with local heat source // Russian J. Eng. Thermophys. 1996. V. 6. N 2. P. 105-138.
20. **Кабов О. А.** Формирование регулярных структур стекающей пленки жидкости при локальном нагреве // Теплофизика и аэромеханика. 1998. Т. 5, № 4. С. 597-602.
21. **Чиннов Е. А., Кабов О. А.** Формирование струйных течений при гравитационном стекании волновой нагреваемой пленки жидкости // ПМТФ. 2003. Т. 44, № 5. С. 128-137.
22. **Шарыпов О. В., Медведко К. А., Фомин А. В.** Предел двумерного стационарного режима течения пленки жидкости при распространении по подложке тепловой волны // Теплофизика и аэромеханика. 2001. Т. 8, № 3. С. 453-457.
23. **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.
24. **Кабова Ю. О., Кузнецов В. В.** Стеkanie неизоэнтальпического тонкого слоя жидкости с непостоянной вязкостью // ПМТФ. 2002. Т. 43, № 6. С. 134-141.
25. **Дерягин Б. В., Чураев Н. В.** Смачивающие пленки. М.: Наука. 1984.
26. **Лаевский Ю. М., Бабкин В. С.** Фильтрационное горение газов // Распространение тепловых волн в гетерогенных средах / Под ред. Ю. Ш. Матроса. Новосибирск: Наука, 1988. С. 108-145.

*Поступила в редакцию 21/VI 2006 г.*