

***В.В. Головки, В.К. Баронецкий, А.К. Копейка***

*Одесский национальный университет им. И. И. Мечникова, г. Одесса  
Институт горения и нетрадиционных технологий*

### **Распространение пламени по тонким пленкам жидкого топлива на металлических подложках**

Исследовано распространение диффузионного пламени (гептан, этанол) и пламени разложения (азидоэтанол) по тонким пленкам жидкого топлива на медных проволоках. Показано, что скорость распространения пламени уменьшается с увеличением диаметра проволоки и слабо зависит от угла наклона  $\varphi$  проволоки относительно горизонтали в широком диапазоне изменений  $\varphi$  (от 45 до 90 градусов). В механизме распространения пламени, наряду с теплопроводностью подложки, важную роль играет и ее теплоемкость.

Процесс распространения волны горения по веществу, находящемуся в контакте с инертной подложкой, отличается сложным характером теплообмена в системе, влиянием термической толщины компонентов на скорость и пределы распространения волны. Вместе с тем, такой тип волнового горения довольно часто встречается на практике (распространение пламени по деревянным и металлическим конструкциям, по разливам горючих жидкостей, тканям и т. д.).

В работах [1 – 3] было исследовано распространение диффузионного пламени по термически тонкой системе: жидкое топливо, нанесенное на поверхность металлических фольг.

В настоящей работе исследовалось распространение волны горения по тонким пленкам этанола, гептана и азидоэтанола (АЭ) на медных проволоках (подложках), т. е. в условиях теплообмена, отличных от [1-3]. Изучалось распространение как диффузионного пламени (этанол, гептан), так и пламени разложения взрывчатого вещества – азидоэтанола. Основной целью работы было выяснение особенностей распространения пламени по пленкам топлив, отличающихся механизмом горения, а также влияние ориентации подложки на скорость процесса.

Эксперименты проводились на установке, схема которой приведена на рис. 1. Тонкие медные проволоки (1) длиной 0,5 м и различных диаметров ( $d = 0,09 \div 1$  мм) закрепляли вертикально в зажимах (2), и на их поверхность наносилось топливо. Толщина слоя топлива оценивалась весовым и оптическим методами и составляла в экспериментах 10 – 20 мкм. Постоянство толщины пленки топлива в период подготовки образцов обеспечивалась непрерывной дозировкой топлива на проволоку вплоть до момента зажигания. Поджиг осуществлялся в верхней части проволоки, и исследовалось распространение пламени сверху вниз. Для измерения характерных температур подложки использовали медь-константановую термопару (3), медным элементом которой служила

сама подложка. Термограммы снимались при помощи запоминающего осциллографа С 8-13. Конструкция установки позволяла изменять ориентацию проволоки (угол  $\varphi$ ) относительно горизонтальной плоскости.

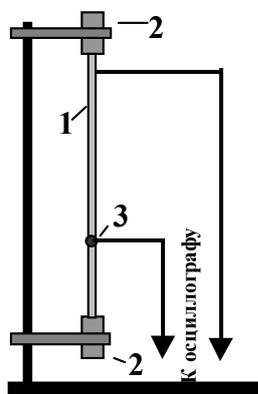


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

Как показали эксперименты, качественная картина распространения пламени по пленкам топлива, нанесенных на тонкие проволоки, одинакова для всех исследованных топлив. После небольшого нестационарного периода, реализуется стационарное распространение пламени с постоянной линейной скоростью  $u$ . Это означает, что структура волны горения представляет собой неизменное во времени пространственное распределение температур и концентрационных профилей.

На рис. 2 приведена типичная фотография распространения пламени по пленке этанола. Видно, что пламя охватывает проволоку, способствуя интенсивному теплообмену между факелом и подложкой. Для выяснения механизма передачи тепла по слоевой системе, сравним характерные времена тепловой релаксации в слоях топлива –  $\tau_f = \frac{h_f^2}{a_f}$ , подложки –  $\tau_s = \frac{h_s^2}{a_s}$  и характерного време-

ни передачи тепла вдоль проволоки –  $\tau_b = \frac{a_s}{u^2}$ . Здесь  $h_f$ ,  $h_s$  – толщина пленки то-

плива и подложки;  $a_f$ ,  $a_s$  – коэффициенты температуропроводности топлива и подложки;  $u$  – скорость распространения пламени. Как показали оценки характерных времен для условий экспериментов,  $\tau_b$  более, чем на порядок больше  $\tau_f$  и  $\tau_s$ . Это означает, что выравнивание температуры в толще подложки и топлива происходит гораздо быстрее, чем передача тепла вдоль проволоки. Следовательно, распределения температур по радиусу проволоки и в толще жидкой пленки топлива не существенно влияют на характер процесса, и есть основания полагать, что такая слоевая система является «термически тонкой» [4].

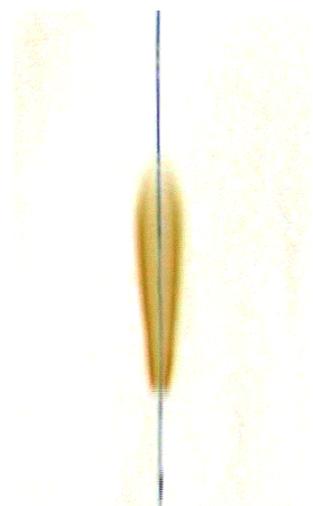


Рис. 2. Факел этанола на проволоке диаметром 0,53 мм

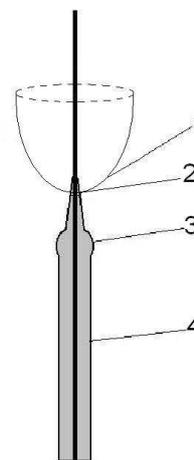


Рис. 3. Структура горения жидкого топлива на проволоках

Таким образом, физическая картина процесса распространения диффузионного пламени такова: тепло от факела пламени нагревает проволоку и передается теплопроводностью по проволоке, нагревая жидкое топливо.

Детальная визуализация процесса распространения пламени позволяет выделить следующие характерные элементы (рис. 3): фронт пламени (1) с передней кромкой (2); небольшой валик жидкого топлива (3) перед кромкой факела; пленка топлива (4). Образование валика топлива перед фронтом пламени можно объяснить течением пленки топлива в направлении градиента температуры (эффект Марангони) [1]. В опытах удавалось создать условия, когда перед фронтом пламени образовывался капля жидкости, размером  $\sim 2$  мм, которая скользила перед кромкой пламени с постоянной скоростью, равной скорости распространения пламени, т. е. относительное расположение капли топлива и передней кромки факела пламени не менялось.

Для получения информации о структуре тепловой волны в подложке, проводилось термографирование процесса распространения пламени. Типичная термограмма приведена на рис. 4. Как видно, можно выделить две характерные температуры –  $T_1$  и  $T_2$ .  $T_2$  – максимальная температура части проволоки, находящейся в факеле пламени. Температура  $T_1$  соответствует небольшому плато, указывающему на фазовый переход топлива, обусловленный тем, что на спае термопары перед кромкой факела пламени образуется небольшая капелька топлива. Испаряющаяся капелька «замораживает» температурный профиль проволоки перед фронтом пламени. Характерные значения температур медных проволок диаметром 0,3 мм, наблюдавшихся в опытах приведены в табл. 1. В этой же таблице приведены удельные теплоты сгорания и испарения ( $Q_{сг}$  и  $L$  соответственно) и температуры кипения топлив  $T_k$ .

Таблица 1

Топливо	$Q_{сг}, \frac{\text{ккал}}{\text{г}}$	$L, \frac{\text{ккал}}{\text{моль}}$	$T_{к}, \text{К}$	$d = 0,3 \text{ мм}$	
				$T_1, \text{К}$	$T_2, \text{К}$
Гептан	11,6	8,7	371	370	600
Этанол	6,5	10,3	351	350	580
АЭ	2,2	11,4	433	420	640

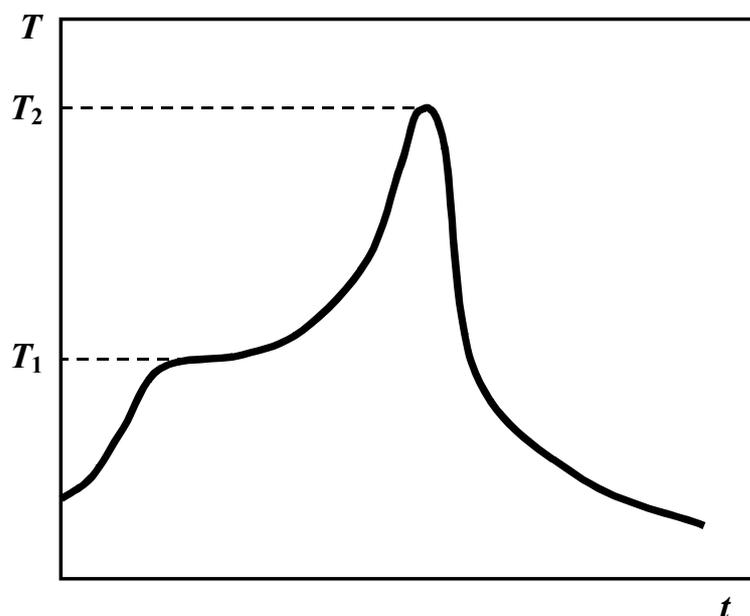


Рис. 4. Характерная термограмма процесса горения пленок топлива

Из табл. 1 видно, что при распространении диффузионных пламен по пленкам топлива (гептан, этанол), чем больше теплота сгорания ( $Q_{сг}$ ) топлива, тем выше и температура проволоки  $T_2$ . При распространении пламени по пленке азидоэтанола такой корреляции не наблюдается, поскольку кинетическое пламя разложения паров АЭ образуется непосредственно у поверхности жидкого топлива [5], что обуславливает меньшую конусность факела, чем факела диффузионных пламен. Такая конусность обеспечивает лучшие условия теплообмена факела пламени АЭ и проволоки. Соответственно характерные температуры подложки  $T_1$  и  $T_2$  оказываются сравнительно высокими. Температуры  $T_1$  перед передней кромкой факела для всех примененных нами топлив близки к их температурам кипения. Таким образом, температурное состояние подложки определяется не только условиями теплообмена проволоки с факелом пламени и пленкой топлива, но и физическими свойствами самого топлива.

Обратимся теперь к зависимостям скорости распространения пламени от диаметра проволок (рис. 5). Линией на графике показана расчетная кривая зависимости скорости распространения пламени от диаметра подложки для АЭ.

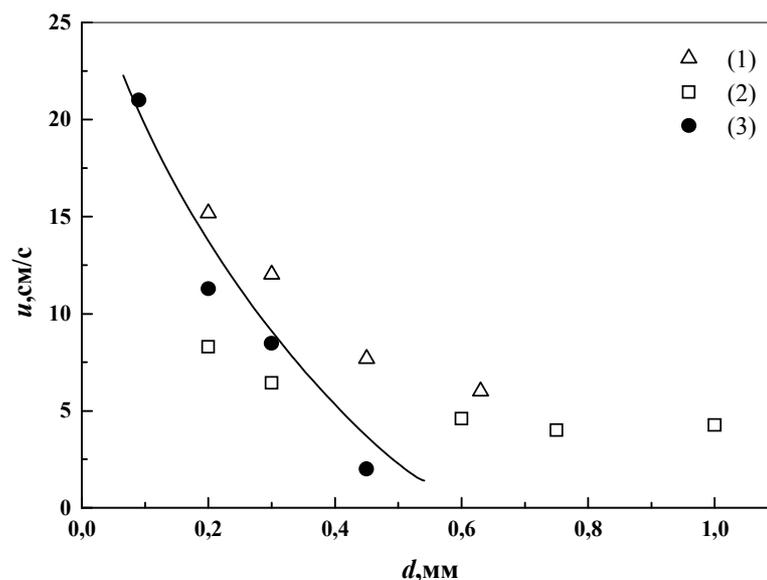


Рис. 5. Зависимости скорости распространения пламени от диаметра проволок для различных топлив (гептан (1), этанол (2), азидоэтанол (3))

Отметим, что величина скорости горения пленок исследованных топлив в условиях экспериментов на 2 – 3 порядка превышает значения скорости горения топлив в стеклянных трубках [7]. Увеличение диаметра проволоки приводит к снижению температуры пленки топлива и, как следствие, уменьшению скорости распространения пламени.

Это связано с тем, что отношение количества тепла, подводимого от факела к проволоке и тепла, которое тратится на прогрев самой проволоки убывает с ростом  $d$ . Несмотря на общее подобие кривых  $u(d)$ , их характер несколько различен. Так, для пленок АЭ наблюдается более резкая зависимость скорости пламени от диаметра проволоки, чем для пленок гептана и этанола. Очевидно, это связано с механизмом горения топлив, определяющим влияние начальной температуры вещества на скорость его горения. Известно что, АЭ горит в кинетическом режиме т. к. содержит в себе горючее и окислитель и не нуждается во внешнем окислителе. Соответственно скорость его горения экспоненциально зависит от начальной температуры топлива [5, 7]. Для углеводородных топлив, горящих в диффузионном режиме, скорость горения лишь логарифмически увеличивается с увеличением температуры топлива. Поэтому для пленок гептана и этанола, скорость распространения пламени слабее зависит от диаметра подложки, чем для пленок АЭ. Различие в наклонах кривых  $u(d)$  для гептана и этанола, по-видимому, определяется удельной теплотой испарения: у гептана эта она меньше, чем у этанола, а значит меньшее количество энергии необходимо для его испарения. Поэтому зависимость  $u(d)$  для гептана менее чувствительна к изменению подводимого теплового потока.

При распространении пламени по пленке АЭ, находящегося в тепловом контакте с металлической подложкой имеет место дополнительный теплоподвод в зону химической реакции по подложке. Это приводит к повышению температу-

ры горения [8]. В отсутствии внешнего теплоподвода, температура горения определяется величиной тепловыделения в зоне реакции:

$$Q = c(T_b - T_0) \quad (1)$$

где  $Q$  – количество теплоты, выделяемое единицей массы,  $c$  – удельная теплоемкость топлива,  $T_b$  – температура горения паров топлива,  $T_0$  – начальная температура топлива.

Если же есть внешний тепловой поток с плотностью  $q$ , то температура горения  $T_{bq}$  возрастает и определяется соотношением:

$$\frac{q}{\rho u_q} + Q = c(T_{bq} - T_0) \quad (2)$$

где  $u_q$  – скорость распространения фронта реакции при наличии внешнего теплоподвода,  $\rho$  – плотность паров АЭ. В этом случае отношение скоростей горения с внешним теплоподводом  $u_q$  и без него –  $u_0$  – представляется в виде [8]:

$$\frac{u_q}{u_0(T_b)} \approx \frac{u_0(T_{bq})}{u_0(T_b)} = \exp\left[\frac{E}{2RT_b^2} \frac{q}{\rho c u_q}\right], \quad (3)$$

где  $E$  – энергия активации реакции распада АЭ,  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $u_0(T_b)$  определяется уравнением Зельдовича-Беляева. Для распространения пламени по пленке АЭ на тонкой проволоке плотность теплового потока можно записать в виде:

$$q = \alpha(T_2 - T_{II}), \quad (4)$$

где  $T_{II}$  – температура паров АЭ;  $T_2$  – температура части проволоки, находящейся в факеле,  $\alpha$  – коэффициент теплообмена. Тогда уравнение для расчета скорости пламени по пленкам АЭ на подложках будет:

$$u_q = u_0 \exp\left[\frac{E}{2RT_b^2} \frac{a \text{Nu}(T_2 - T_{II})}{d \cdot u_q}\right], \quad (5)$$

где  $a = \frac{\lambda}{c\rho}$  – температуропроводность паров АЭ,  $d$  – диаметр проволоки.

В расчетах принимались следующие значения:  $E = 158760 \frac{\text{Дж}}{\text{моль}}$ ,

$T_b = 1100 \text{ К}$ ,  $\lambda = 738 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ ,  $\rho = 2,5 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ ,  $c = 2100 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$ . Ввиду малости толщины

пленки топлива в расчетах принималось  $T_{II} \approx T_1$ , а  $\text{Nu} = 4$ . Результаты расчета для АЭ приведены на рис. 5 (сплошная кривая). Как видим, расчетные данные хорошо согласуются с экспериментальными. Отметим, что такой подход к расчету скорости распространения пламени по пленкам топлива на подложках справедлив лишь для топлив, скорость горения которых лимитируется кинетикой химических реакций.

Экспериментально были обнаружены верхний ( $d_{\text{кр1}}$ ) и нижний ( $d_{\text{кр2}}$ ) пределы распространения пламени по диаметру проволоки (табл. 2).

Таблица 2

Топливо	$d_{кр1}$ , мм	$d_{кр2}$ , мм	$T_k$ , К
АЭ	0,50	0,09	433
Гептан	0,65	0,15	371
Этанол	1,40	0,20	351

Существование верхнего предела распространения пламени обусловлено тем, что с увеличением диаметра проволоки, большее количество тепла, поступающего от факела пламени, рассеивается в массе проволоки. Соответственно, уменьшается и подвод тепла к жидкой пленке топлива и его не хватает на образование стехиометрической смеси паров топлива с воздухом – горение затухает. По-видимому, предельный диаметр проволок связан с температурой кипения топлива. Так, чем меньше  $T_k$ , тем больше критический диаметр проволок (см. табл. 2).

Наличие верхнего предела распространения пламени свидетельствует о том, что в механизме передачи тепла по подложке, важную роль играет и теплоемкость слоевой системы. Действительно, эффективная теплопроводность термически тонкой системы определяется как [7]:

$$a_* = \frac{\lambda_f h_f + \lambda_s h_s}{c_f \rho_f h_f + c_s \rho_s h_s} \quad (6)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности,  $c$  – удельная теплоемкость,  $\rho$  – плотность. Индексы  $s$  и  $f$  относятся к подложке и жидкому топливу соответственно. Поскольку в условиях экспериментов  $\lambda_s h_s \gg \lambda_f h_f$ , то последнее выражение можно привести к виду:

$$a_* = a_s \cdot \beta \quad (7)$$

где  $\beta = \frac{c_s \rho_s h_s}{c_f \rho_f h_f + c_s \rho_s h_s}$  – есть доля теплоемкости подложки в слоевой системе

«пленка топлива – подложка». Поэтому скорость распространения пламени должна зависеть не только от теплопроводности проволоки, но и от ее теплоемкости. Действительно, как видно из рис. 6, скорость пламени уменьшается с увеличением  $\beta$ . При этом, для пленок гептана, имеющего меньшую удельную теплоту испарения, скорость распространения пламени оказывается более чувствительной к изменению теплоемкости подложки. На графике для наглядности линиями усреднены зависимости  $u(\beta)$  отдельно для гептана (1) и сразу для этанола с АЭ (2 и 3).

Нижний предел распространения пламени связан с тем, что с уменьшением диаметра проволоки интенсифицируется теплообмен между факелом и проволокой. Проволоки прогреваются до высоких температур, соответственно увеличивается и поток тепла по проволоке к пленке топлива, скорость испарения которого увеличивается. Создаются условия, когда топливо оказывается испаренным на большом расстоянии от кромки факела. В этом случае прекращается подвод паров топлива к фронту горения и процесс распространения пламени затухает. Поскольку температуры кипения этанола и гептана меньше, чем АЭ,

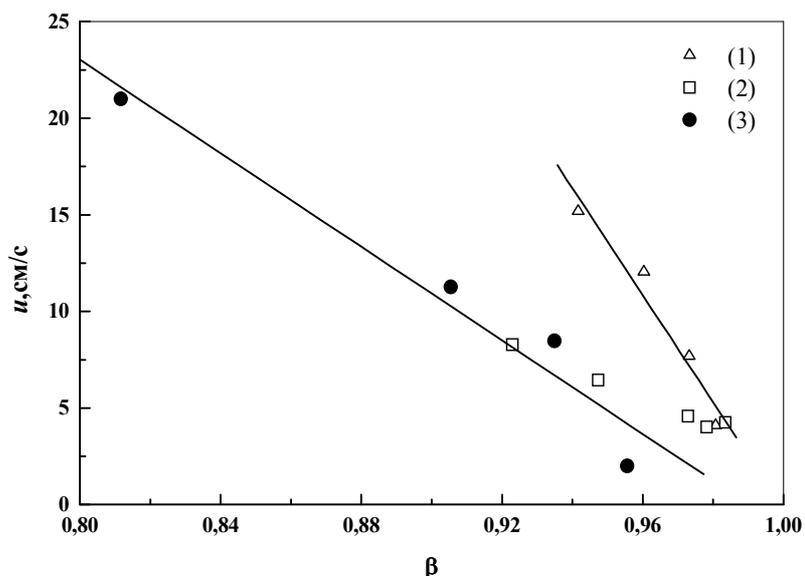


Рис. 6. Зависимость скорости распространения пламени от доли теплоемкости подложки в системе «топливо–подложка» (гептан (1), этанол (2), азидоэтанол (3)).

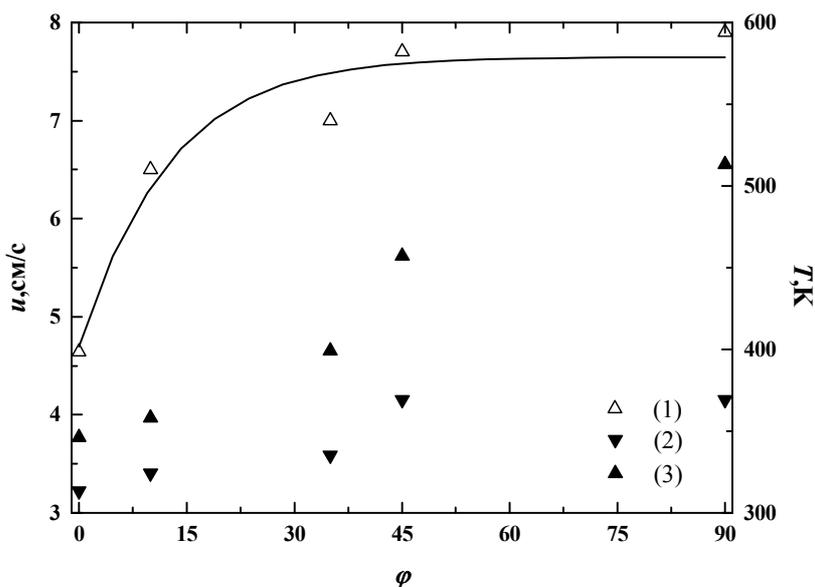


Рис. 7. Зависимости скорости распространения пламени гептана – 1, характерных температур  $T_1$  – 2 и  $T_2$  – 3 от угла наклона проволоки  $\phi$ . Диаметр проволоки ( $d = 0,5$  мм).

то и предел распространения пламени наблюдался на проволоках большего диаметра. О температурном состоянии тонких проволок на пределе горения свидетельствует тот факт, что при распространении пламени по пленке АЭ на проволоках диаметром 0,09 мм, проволока перегорала, т. е. ее температура достигала температуры плавления меди  $T_{пл} = 1356$  К.

Обсудим теперь вопрос о влиянии ориентации проволоки в пространстве на скорость распространения пламени. В опытах проводилось изменение наклона проволоки от вертикали ( $\varphi = 90^\circ$ ) к горизонтальному положению ( $\varphi = 0^\circ$ ). Для пленок гептана на рис. 7 представлены зависимости скорости распространения пламени (усреднено линией) и характерных температур  $T_1$  и  $T_2$  от угла наклона проволоки  $\varphi$ .

При изменении угла наклона проволоки, скорость пламени и температура  $T_2$  части проволоки, находящейся в факеле пламени, меняются незначительно вплоть до  $\varphi \approx 45^\circ$ . При  $\varphi < 45^\circ$  происходит резкое уменьшение как температуры, так и скорости пламени, обусловленное изменением условий теплообмена проволоки и факела за счет изменения площади их соприкосновения. Так, при  $\varphi = 90^\circ$  (вертикальное положение проволоки) факел пламени полностью охватывает проволоку, обеспечивая ее максимальный прогрев. С уменьшением угла наклона, за счет конвекции, площадь соприкосновения факела и проволоки уменьшается. Переход к полному охвату факелом проволоки наблюдается при  $\varphi \approx 45^\circ$ . Отметим, что при конвективном распространении пламени (поджиг снизу), скорость распространения увеличиваются в 5 – 7 раз.

Таким образом, высокие скорости горения пленок топлива на металлических проволоках обусловлены высокой скоростью передачи тепла теплопроводностью подложки. Подводимое в предпламенную зону тепло, не только прогревает топливо, но идет на испарение и подогрев его паров, увеличивая энтальпию пара до уровня, обеспечивающего существование стационарной волны горения. Вместе с тем, в механизме передачи тепла в волне горения важную роль играет и теплоемкость подложки.

### Литература

1. Коржавин А. А., Бунев В. А., Гордиенко Д. М., Бабкин В. С. Поведение пламен, распространяющихся по пленкам жидкости на металлических подложках // Физика горения и взрыва. – 1998. – Т. 34, № 3. – С. 15 – 18;
2. Коржавин А. А., Бунев В. А., Намятов И. Г., Бабкин В. С. Распространение пламени над пленкой жидкого топлива на металлических подложках // Физика горения и взрыва. – 2000. – Т. 36, № 3. – С. 25 – 30;
3. Намятов И. Г., Минав 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;
4. Рыбанин С. С., Соболев С. Л. Скорости и пределы горения конденсированного вещества при теплообмене с инертной средой. – «Препринт» /РАН ОНХФ, №993. – Черноголовка. – 1988. – 32 с.

5. Головка В. В., Канишин С. П. и др. Горение капли азидоэтанола при атмосферном и пониженных давлениях // Физика горения и взрыва. – 1990. – Т.26, № 5. – С. 61 – 64.
6. Бахман Н.Н., Беляев А.Ф. Горение гетерогенных конденсированных систем. – М.: Наука. – 1967. – С. 226;
7. Копейка А. К. Кандидатская диссертация. – ОНУ им. И. И. Мечникова, Одесса. – 2000. – С. 239;
8. Мержанов А. Г., Хайкин Б. И. Теория волн горения в гомогенных средах. – ИСМ АН СССР. – Черногоровка. – 1992. – 160 с.

*В. В. Головка, В. К. Баронецкий, А. К. Копейка*

**Поширення полум'я по тонким плівкам рідинного палива  
на металевих субстратах**

**АНОТАЦІЯ**

Досліджено поширення дифузійного полум'я (гептан, етанол) і полум'я розкладу (азидоетанол) по тонких плівках рідинного палива на мідних дротах. Показано, що швидкість поширення полум'я зменшується зі збільшенням діаметра дроту і слабо залежить від кута нахилу  $\varphi$  дроту відносно горизонталі в широкому діапазоні зміни  $\varphi$  (від 45 до 90 градусів). У механізмі поширення полум'я поряд з теплопровідністю субстрату, важливу роль відіграє її теплоємність.

*V. V. Golovko, V. K. Baronetskiy, A.K. Kopeyka*

**Flame spread over thin layers of liquid fuel on metal substrates**

**Summary**

The results of experimental study of flame spread over thin layers of heptane, ethanol, and ethanol azide at contact of the liquid fuels with thin copper wires are presented. It was shown, that the velocity of flame decreases with growth of diameter of wire and one insignificant depends from the value of inclination angle  $\varphi$  of a wire in interval (from 45 to 90 degrees). The heat capacity of substrate with the thermal conductivity is plays an important part for the mechanism of flame spread.