

УДК 536.46

Головко В.В., Баронецкий В.К., Величко А.А., Копейка А.К., Исаев Д.И.

*Одесский национальный университет имени И.И. Мечникова
Институт горения и нетрадиционных технологий*

Распространение диффузионного пламени по пленкам горючего на металлических подложках

Исследовано распространение диффузионного пламени по тонким пленкам ряда спиртов, нанесенных на металлические проволоки. Показано, что скорость распространения пламени и предельные диаметры проволок определяются удельными теплотами испарения горючих и объемными теплоемкостями подложек. Теплопроводность материала подложки, обеспечивая передачу тепла в волне горения, не оказывает существенного влияния на скорость пламени.

Процесс распространения пламени по поверхности горючего вещества, находящегося в контакте с инертной подложкой, является одним из возможных режимов волнового горения. В таком режиме свойства волны горения зависят как от условий теплообмена между высокотемпературным факелом пламени, подложкой и горючим, так и особенностей физико-химических процессов, определяющих превращение горючего вещества. Понятно, что в экспериментах одновременный учет множества факторов, влияющих на структуру и скорость волны горения практически невозможен. В работах [1-3] предложен подход раздельного исследования влияния на свойства волны диффузионного горения жидких горючих их реакционной способности, теплофизических свойств горючих и подложек. Реализация такого подхода требует проведения систематических экспериментальных исследований с различными горючими и инертными подложками.

Целью настоящей работы было выяснение влияния на скорость и пределы распространения диффузионного пламени теплофизических характеристик жидких горючих и металлических подложек.

В качестве горючих были выбраны спирты с различными удельными теп-

Таблица 1 Тепловые константы горючих веществ

Горючее	T_{κ} , К	L , кДж/моль	$Q_{св}$, кДж/моль
Этиловый спирт	351	43.2	1370
Изопропиловый спирт	355	45.2	2010
Пропиловый спирт	370	48.1	2003
Амиловый спирт	411	56.9	3320

лотами испарения L , температурами кипения T_k и теплотами сгорания $Q_{сз}$, (табл. 1).

Исследовалось распространение пламени сверху вниз по тонким пленкам горючих ($h_f \approx 20$ мкм), нанесенных на проволоки из разных металлов с диаметрами $d = (0.2 \div 2.0)$ мм. Эксперименты проводились на установке и по методике приведенной в работе [4].

Для выяснения механизма передачи тепла по слоевой системе, сравним характерные времена тепловой релаксации в слоях топлива – $\tau_f = h_f^2 / a_f$, подложки – $\tau_s = h_s^2 / a_s$ и характерного времени передачи тепла вдоль проволоки – $\tau_b = a^* / u_2$. Здесь h_f, h_s – толщина пленки горючего и подложки; a_f, a_s – коэффициенты температуропроводности горючего и подложки; u – скорость распространения пламени. Так, для этилового спирта ($h_f \approx 20$ мкм) на медных проволоках $\tau_b \approx 10^{-2}$ с, $\tau_s \approx 10^{-3}$ с, $\tau_f \approx 10^{-4}$ с, т.е. $\tau_b > \tau_s > \tau_f$. Это означает, что скорость передачи тепла по толщине слоя горючего и диаметру подложки существенно выше скорости передачи тепла вдоль подложки. Следовательно, распределения температур по толщине пленки горючего и радиусу проволоки не лимитируют процесс передачи тепла в слоевой системе, а система является термически тонкой с температуропроводностью [5]

$$a^* = \frac{\lambda_f h_f + \lambda_s h_s}{c_f \rho_f h_f + c_s \rho_s h_s}, \quad (1)$$

где λ, c, ρ – коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость, плотность; индексы f и s относятся соответственно к горючему и подложке.

Для получения информации о структуре тепловой волны в подложке, проводилось термографирование процесса распространения пламени. Типичная термограмма приведена на рис. 1. Можно выделить две характерные температуры – T_1 и T_2 . Температура T_2 – максимальная температура части проволоки, находящейся в факеле пламени. Температура T_1 соответствует небольшому плато, указывающему на фазовый переход горючего, обусловленный тем, что на спае термопары образовывалась небольшая капелька горючего. Испаряющаяся капелька «замораживает» температурный профиль в проволоке перед фронтом пламени [4]. Характерные температуры приведены в табл. 2 для мед-

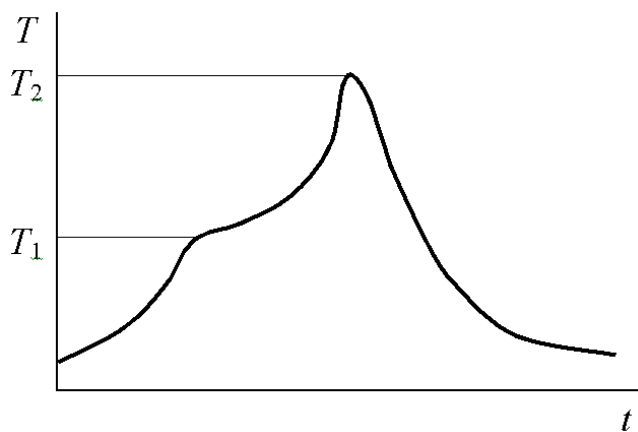


Рис. 1 Термограмма процесса распространения пламени

Таблица. 2. Характерные температуры и скорость пламени на медной проволочке ($d = 0,20$ мм)

Горючее	u , см/с	T_1 , К	T_2 , К
Этиловый спирт	8.2	350	580
Изопропиловый спирт	7.8	350	600
Пропиловый спирт	7.2	370	600
Амиловый спирт	6.0	410	630

ной проволочки диаметром $d = 0.20$ мм. Из таблицы видно, чем больше теплота сгорания горючего ($Q_{сг}$), тем выше и температура T_2 части проволоки, находящейся в факеле пламени. Температуры проволоки перед передней кромкой факела (T_1) для всех исследованных спиртов близки к их температурам кипения. Это свидетельствует о том, что температурное состояние подложки определяется не только условиями теплообмена проволоки с факелом, но и физическими свойствами самого горючего.

Обратимся теперь к результатам экспериментов по определению скоростей распространения пламени. На рис. 2 приведены экспериментальные зависимости скорости пламени от диаметра медных проволочек.

Как видно, характер зависимостей для различных спиртов подобен. С увеличением диаметра подложек скорость распространения диффузионного пламени монотонно падает. Это связано с тем, что тепло, подводимое от факела к проволоке $Q_1 \approx d$, а тепло, необходимое для прогрева проволоки $Q_2 \approx d^2$. Следовательно, с увеличением диаметра проволочек большее количество тепла рассеивается в массе проволоки, и они прогреваются до меньших температур. Соответственно меньше тепла передается пленке горючего, что уменьшает скорость испарения, а значит и скорость распространения пламени. Несмотря на общее подобие зависимостей, уровень скоростей распространения пламени по пленкам различных спиртов различен. Для топлив, горящих в диффузионном

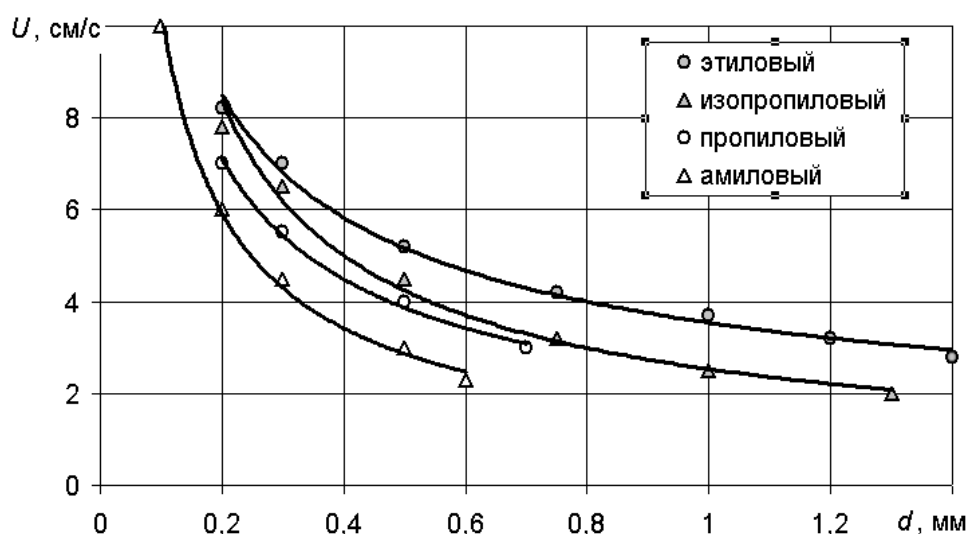


Рис. 2 Зависимость скорости распространения пламени от диаметра проволоки для различных спиртов

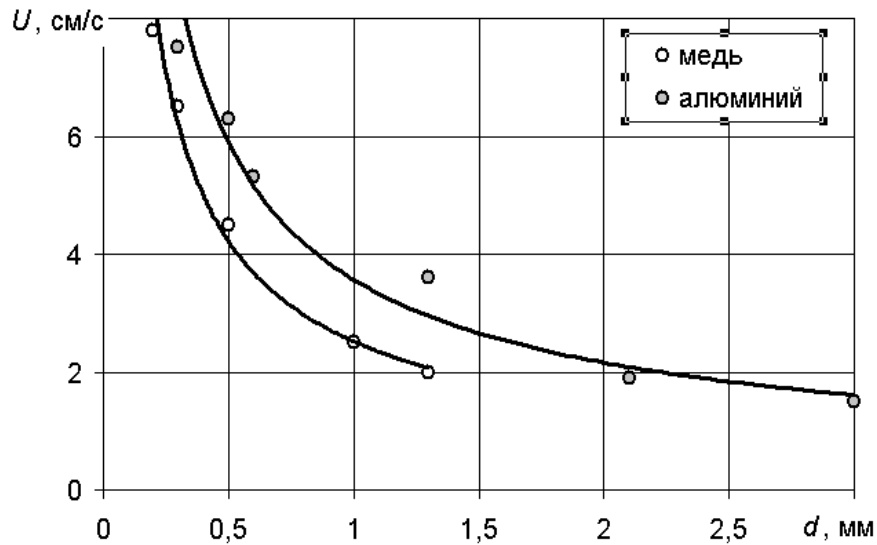


Рис. 3 Зависимость скорости распространения пламени по пленкам изопропилового спирта от диаметра проволок

режиме, скорость горения определяется процессами испарения и смешения паров горючего с кислородом воздуха. Наиболее медленной стадией является испарение, скорость которого зависит от удельной теплоты испарения L . Если сравнить уровни скоростей распространения пламени по пленкам различных спиртов с удельными теплотами испарения (см. табл. 1 и 2) то видно, чем ниже теплота испарения, тем выше скорость пламени. Таким образом, одним из параметров, определяющих скорость распространения пламени по тонким пленкам горючего, является удельная теплота испарения.

Помимо свойств горючего, скорость распространения пламени зависит и от теплофизических характеристик вещества подложки (рис. 3).

Как видно, скорость распространения пламени на проволоках из алюминия выше, чем из меди, хотя коэффициент температуропроводности меди больше, чем алюминия: $a_{Cu} = 1.16 \text{ см}^2/\text{с}$, $a_{Al} = 0.86 \text{ см}^2/\text{с}$. Однако объемная теплоемкость алюминия $(c\rho)_{Al} = 0.58 \text{ кал}/(\text{см}^3 \cdot \text{с})$ меньше, чем у меди $(c\rho)_{Cu} = 0.83 \text{ кал}/(\text{см}^3 \cdot \text{с})$. Это означает, что при одинаковых условиях теплообмена проволочек с факелом пламени, алюминиевая проволочка разогревается до больших температур, чем медная. В этом случае и разогрев пленки горючего будет выше, а значит и скорость распространения пламени. На рис. 4 приведена зависимость скорости пламени от доли теплоемкости подложки в слоевой системе (β_s) для изопропилового спирта. Видно, что опытные данные хорошо обобщаются линейной зависимостью и находятся в согласии с результатами работы [1]. Учитывая, что для условий экспериментов $\lambda_s h_s \gg \lambda_f h_f$, соотношения (1) можно записать:

$$a^* = \frac{\lambda_s h_s}{c_f \rho_f h_f + c_s \rho_s h_s} = a_s \beta_s, \quad (2)$$

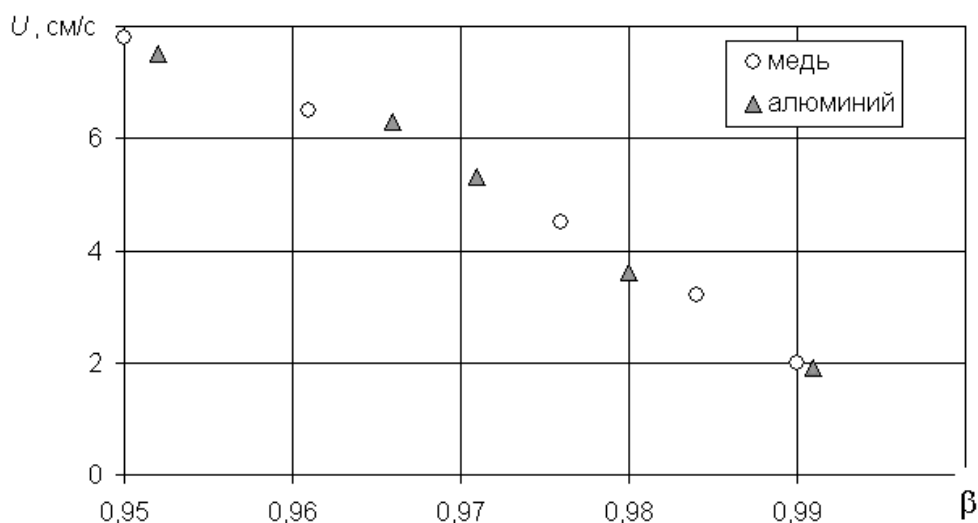


Рис. 4 Зависимость $U(\beta)$.

где $\beta = \frac{c_s \rho_s h_s}{c_f \rho_f h_f + c_s \rho_s h_s}$ – доля теплоемкости подложки в слоевой системе «пленка горючего – подложка»; a_s – коэффициент температуропроводности материала подложки.

Из рис. 4 следует, что скорость распространения диффузионного пламени резко падает с увеличением β_s , что связано с рассеянием тепла, поступающего от факела, в подложке и уменьшением ее разогрева. Как следует из (2), эффективная температуропроводность слоевой системы зависит и от a_s . Зависимость скорости распространения пламени по пленкам изопропилового спирта на проволоках одного и того же диаметра ($d = 0.25$ мм), но из разных материалов (железо, константан, медь) от a_s приведена на рис. 5.

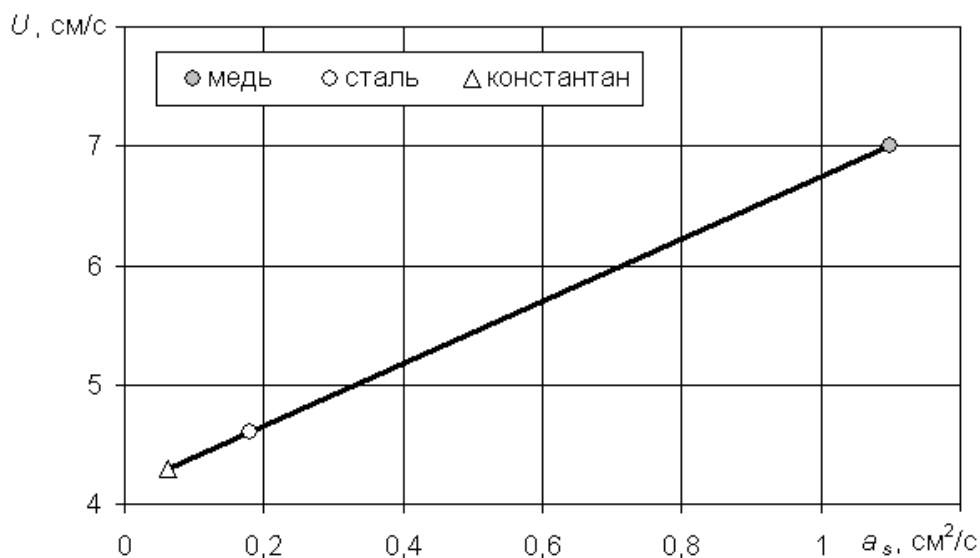


Рис. 5 Зависимость скорости распространения пламени от температуропроводности a_s материала подложки.

Таблица 3 Критические диаметры медных проволок для различных горючих

Горючее	$T_{к}, K$	$L, кДж/моль$	$d_{кр}, мм$
Этиловый спирт	351	43.2	1.4
Изопропиловый спирт	355	45.2	1.3
Пропиловый спирт	370	48.1	0.7
Амиловый спирт	411	56.9	0.6

Видно, что скорость пламени увеличивается с увеличением температуропроводности материала подложки, т.е. в механизме переноса тепла в волне горения теплопроводность подложки играет важную роль. Однако из сравнения данных рис. 4 и рис. 5 следует, что значительно более сильное влияние на скорость пламени оказывает объемная теплоемкость материала подложки. Именно это положение объясняет тот факт, что пламя может распространяться и по пленкам горючего на подложках из поливинилхлорида (изоляция проводов), имеющего низкое значение коэффициента температуропроводности ($a_s = 10^{-3} \text{ см}^2/\text{с}$).

Одной из особенностей распространения пламени по горючему, находящемуся в тепловом контакте с инертной подложкой, является конкуренция температурных и теплообменных факторов [6]. Действительно, с увеличением разогрева проволочек, увеличивается температура пленки горючего и растет скорость распространения пламени. Однако, с увеличением скорости пламени ухудшается теплообмена факела пламени с проволочкой и разогрев проволочки уменьшается. Это приводит к возникновению обратной связи между скоростью волны горения и температурой подложки, что вызывает появления пределов горения [7]. Как видно из рис. 2, скорость распространения пламени уменьшается с увеличением диаметра проволочки и при некотором критическом диаметре ($d_{кр}$) распространение пламени прекращается. Критические диаметры распространения пламени на медных проволоках и некоторые свойства горючих приведены в табл. 3.

Видно, что предельные диаметры проволочек уменьшаются по мере увеличения теплоты испарения горючего и его температуры кипения. Поскольку предельные условия горения связаны с разогревом инертной подложки [5], то критические диаметры должны зависеть и от теплофизических свойств материала проволочек. Из рис. 3 следует, что на медных проволочках критический диаметр потухания $d_{кр}$ меньше, чем для алюминиевых, имеющих более низкую, чем у меди, объемную теплоемкость.

Таким образом, наиболее важными параметрами, определяющими скорость распространения диффузионного пламени и предельные диаметры подложек, являются удельная теплота испарения горючего и объемная теплоемкость подложки. Теплопроводность подложки обеспечивает передачу тепла в волне горения, однако не оказывает существенного влияния на скорость пламени.

Литература:

1. Коржавин А.А., Бунев В.А., Гордиенко Д.М., Бабкин В.С. Поведение плен, распространяющихся по пленкам жидкости на металлических подложках // Физика горения и взрыва. – 1998. – Т. 34, № 3. – С. 15.
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.
3. 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.
4. Головки В.В., Баронецкий В.К., Копейка А.К. Распространение пламени по тонким пленкам жидкого топлива на металлических подложках // Физика аэродисперсных систем. – 2005. – Т. 42. – С. 76.
5. Рыбанин С.С., Стесик Л.Н. Теория горения конденсированного топлива с плоским теплопроводящим элементом // Материалы IV Всесоюзного симпозиума по горению и взрыву. – М.: Наука, 1977. – С. 213-220.
6. Рыбанин С.С., Соболев С.Л. Скорость и пределы горения конденсированного вещества при теплообмене с инертной средой. – 1988, Черногловка. – № 993.
7. Зельдович Я.Б., Лейпунский О.И., Либрович В.Б. Теория нестационарного горения пороха. – М.: Наука, 1975. – 131 с.

Головки В.В., Баронецкий В.К., Величко А.А., Копейка А.К., Исаев Д.И.

Розповсюдження дифузійного полум'я по плівках палива на металевих підкладках

АНОТАЦІЯ

Досліджено поширення дифузійного полум'я по тонких плівках ряду спиртів, нанесених на металеві дроти. Показано, що швидкість поширення полум'я й граничних діаметрів дротів визначаються питомими теплотами випаровування паливних й об'ємними теплоємностями підкладок. Теплопровідність матеріалу підкладки, забезпечуючи передачу тепла у хвилі горіння, не робить істотного впливу на швидкість полум'я.

Golovko V.V., Baronezkiy V.K., Velichko A.A., Kopeyka A.K., Isaev D.I.

The diffusion flame propagation over fuel films on metal wires

SUMMARY

The diffusion flame propagation in thin films of some spirits, deposited on metal wires was investigated. It was shown, that the flame propagation velocity and wires critical diameters depended on fuels evaporation heat and wire bulk heat capacity. It was shown that the metal thermal conductivity, which provided heat transfer in the combustion wave, slightly affected the flame velocity.