

**Разогрев подложки при распространении пламени по пленке горючего**

*Исследован механизм переноса энергии при распространении диффузионного пламени по тонким пленкам этанола, нанесенных на медную проволочку. Показано, что в предпламенный период разогрев горючего и его испарение обеспечивается продольной передачей тепла по подложке. Кромка факела располагается там, где температура слоевой системы обеспечивает условия образования в газовой фазе, вблизи поверхности пленки, горючей смеси стехиометрического состава.*

Одной из центральных задач исследований распространения пламени по поверхности слоевой системы «пленка горючего – инертная подложка» является выяснение механизма переноса энергии, определяющего предпламенный разогрев горючего. Решение такой задачи представляет не только теоретический интерес, но и связано с целым рядом практических приложений, например, проблемы борьбы с пожарами, выбором эффективных методов конверсии сложных химических соединений.

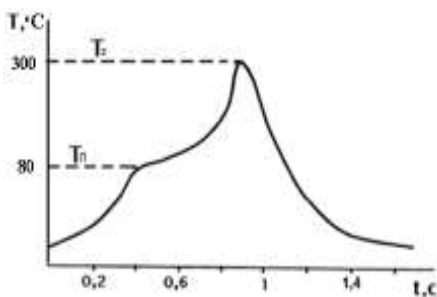
В настоящее время нет единого мнения о том, какой из возможных способов переноса энергии является определяющим в предварительном прогреве горючего и подготовке его к горению. Как правило, выделяют два предельных режима: конвективный и кондуктивный [1, 2].

Целью настоящей работы было выяснение температурного (теплового) состояния слоевой системы в предпламенный период при распространении диффузионного пламени сверху вниз по тонким пленкам этанола ( $h_f \approx 20$  мкм), нанесенных на медную проволоку (подложку) диаметром 0.3 мм, расположенную вертикально.

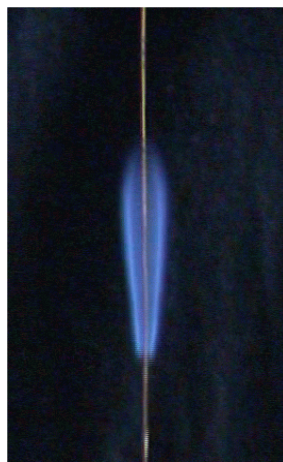
Основная задача экспериментальных и теоретических исследований состояла в определении температурного профиля в подложке на стадии инертного прогрева при распространении по слоевой системе диффузионного пламени. Эксперименты проводились на установке и по методике, приведенной в работах [3, 4].

Для получения информации о структуре тепловой волны в подложке, к медной проволоке приваривали тонкую константановую диаметром 0.1 мм, так, что диффузионное пламя распространялось через спай термопары. Сигнал с термопары подавался на запоминающий осциллограф или на компьютер. Типичная термограмма и фотография факела этанола приведены на рис. 1 и 2.

На термограмме можно выделить две характерные температуры:  $T_n$  и  $T_2$ . Температура  $T_2$  – максимальная температура части проволоки, находящейся в факеле пламени. Температура  $T_n$  соответствует небольшому плато, указывающему на фазовый переход этанола. Появление плато обусловлено тем, что на



*Рис. 1. Типичная термограмма процесса распространения пламени по слоевой системе.*

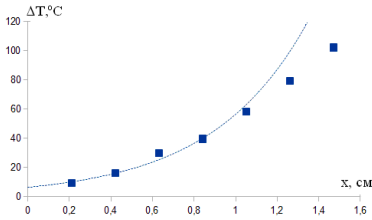


*Рис. 2. Фотография пламени этанола на медной проволоке.*

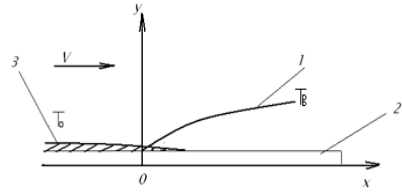
спяе термопары образовывалась небольшая капелька горячего, которая при испарении «замораживает» температурный профиль в проволоке перед фронтом пламени [3]. Это обстоятельство дает возможность установить распределение температуры в предпламенный период (участок термограммы до температуры  $T_n$ ). Обработка экспериментальных данных (рис. 3) свидетельствует о существовании достаточно протяженной ( $\sim 10$  мм) зоны подогрева, где разогрев подложки ( $\Delta T = T - T_0$ ) экспоненциально зависит от координаты. Это означает, что основное количество тепла, поступающего к подложке от продуктов сгорания, передается впередтеплопроводностью по подложке и обеспечивает предпламенный разогрев горячего и его испарение.

Для нахождения аналитического выражения распределения температуры в подложке будем исходить из следующей физической модели распространения пламени по поверхности горячего на инертной подложке. Диффузионное пламя распространяется по горячей смеси паров топлива с кислородом воздуха, образующейся при испарении жидкости и смешении с воздухом вблизи поверхности пленки горячего. Испарение горячего происходит в результате подогрева теплом, передающимся теплопроводностью по подложке. Схема распространения пламени по рассматриваемой слоевой системе приведена на рис. 4.

Подложка с пленкой горячего представляет собой термически тонкую систему [3, 5], поэтому распределением температуры по диаметру подложки можно пренебречь. В системе координат, связанной с движущимся пламенем, газ и подложка с пленкой горячего набегают на пламя с постоянной скоростью  $v$  вдоль оси  $x$ . Уравнение переноса тепла для части подложки, находящейся в продуктах горения, имеет вид:



**Рис. 3.** Профиль температуры в подложке.



**Рис. 4.** Схема распространения пламени по слоистой системе. 1 – фронт пламени, 2 – подложка, 3 – пленка горючего

$$\frac{d}{dx} \left( \lambda \frac{dT}{dx} \right) - c\rho v \frac{dT}{dx} + \frac{\alpha(T_b - T)}{d} = 0. \quad (1)$$

Граничные условия:

$$x \rightarrow \pm\infty, T = T_0, \quad x = 0, T = T_1, \quad \frac{dT}{dx} = \frac{dT_1}{dx}.$$

Здесь:  $\lambda, c, \rho$  – теплопроводность, теплоемкость и плотность подложки соответственно;  $T_b$  – температура пламени;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи;  $d$  – диаметр подложки;  $T$  – температура подложки.

Перейдем к новым переменным  $q$  и  $T$ , где  $q = \lambda \frac{dT}{dx}$  – плотность потока тепла. Тогда уравнение (1) принимает вид:

$$q \frac{dq}{dT} - c\rho v q + \frac{\alpha(T_b - T)}{d} = 0. \quad (2)$$

Будем полагать, что количество тепла, поступающего от факела пламени к подложке максимально, т. е.

$$\frac{\alpha(T_b - T)}{d} \approx \frac{\alpha(T_b - T_0)}{d}.$$

Тогда, обозначив  $\frac{\alpha(T_b - T)}{d} \equiv Q_0$  и  $c\rho v \equiv b$ , уравнение (2) получим в следующем виде:

$$q \frac{dq}{dT} - bq + Q_0 = 0$$

с граничным условием  $T = T_0, q = 0$ . Интегрируя (3), получим

$$q = \frac{Q_0}{b} \left[ 1 + \exp \left( -\frac{b}{Q_0} (q - b(T - T_0)) \right) \right].$$

Тогда  $q = 2 \frac{Q_0}{b}$  или  $T_1 - T_0 = 2 \frac{Q_0}{b^2}$ .

Величину максимального разогрева подложки на границе  $x=0$  легко рассчитать:

$$T_1 - T_0 = \frac{2\alpha(T_b - T_0)a}{\text{ср}dv^2}, \quad (6)$$

где  $a = \frac{\lambda}{\text{ср}}$  – коэффициент температуропроводности подложки.

Как видно, разогрев подложки  $(T_1 - T_0) \sim \frac{1}{v^2}$ . Подобное соотношение хорошо известно в теории горения газов, развитой Я.Б. Зельдовичем и Д.А. Франк-Каменецким.

Для нахождения профиля температуры в подложке на стадии инертного прогрева, упростим уравнение (4). Будем полагать, что в области  $T_0 \leq T \leq T_1$ , перед кромкой пламени, величина  $q$  мало отличается от  $b(T - T_0)$ , тогда в (4) экспоненту можно разложить в ряд<sup>1</sup>. В результате получим следующее выражение для плотности теплового потока в подложке:

$$q = \frac{Q_0}{b} + \frac{b}{2}(T - T_0). \quad (7)$$

Физически, тепловой поток по подложке является результатом сложения теплового потока от факела пламени  $Q_0/b$  и конвективного потока за счет движения слоевой системы относительно пламени. Поскольку  $q = \lambda \frac{dT}{dx}$ , то на границе  $x = 0$  имеет место равенство тепловых потоков:

$$\lambda \frac{dT}{dx} = \frac{Q_0}{b} + b(T - T_0) \quad (8)$$

с граничным условием  $x = 0$ ;  $T = T_1$ .

Интегрирование (8) с учетом соотношения (6) дает аналитическое выражение для профиля температуры в подложке в предвоспламенительный период:

$$[(T - T_0) + (T_1 - T_0)] = 2(T_1 - T_0) \exp\left(\frac{v}{2d}x\right). \quad (9)$$

Полученное распределение температуры подобно распределению температуры при инертном прогреве вещества, известному как распределение В. А. Михельсона:

$$T - T_0 = (T_1 - T_0) \exp\left(\frac{v}{d}x\right). \quad (10)$$

Существенным отличием (9) от (10) является то, что профиль температуры, определяемый выражением (9), более плавный, чем профиль В. А. Михельсона.

Сопоставим теперь экспериментально полученный профиль температуры в подложке (рис. 3) с теоретическим (9). На рис. 5 приведены результаты обработки термограмм инертного прогрева проволоочки.

Линейный участок кривой отвечает стадии инертного прогрева подложки. Характерная толщина зоны прогрева составляет величину порядка 10 мм, что

<sup>1</sup> Это упрощение оправдано, учитывая соотношение (5) и плавный профиль температуры (9).

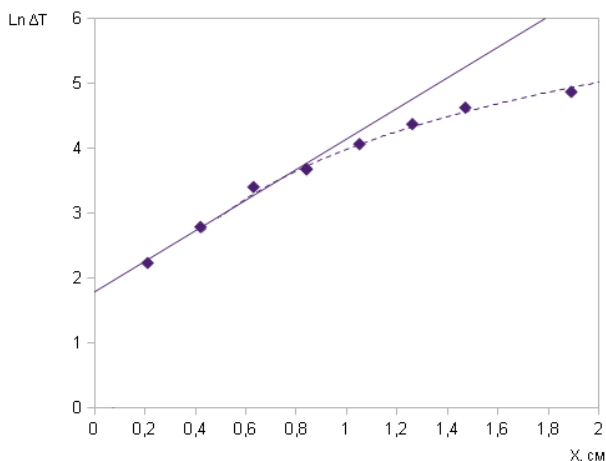


Рис. 5. Зависимость  $\ln \Delta T = f(x)$

согласуется с данными [5]. Отклонение от прямолинейности наблюдается при приближении кромки факела к спаю термопары и, очевидно, связано с потерями тепла на испарение капельки, образующейся на спае. Из сравнения экспериментальной зависимости (рис. 5) с профилем температуры в подложке (9), следует, что разность температур  $T_1 - T_0 = 3^\circ\text{C}$ , т. е. при  $x=0$  и  $T_0 = 20^\circ\text{C}$ ,  $T_1 = 23^\circ\text{C}$ . Это значение температуры подложки близко к температуре, при которой в равновесных условиях при атмосферном давлении образуется стехиометрическая смесь паров этанола с воздухом –  $T_{st} = 22.2^\circ\text{C}$  [7]. Отсюда становится понятным и геометрический смысл поверхности  $x=0$ . Полученный результат находится в согласии с данными работ [5, 8]. По углу наклона линейного участка зависимости  $\ln \Delta T = f(x)$ , с учетом распределения температуры (9), легко определить комплекс  $v/2a$ , величина которого оказалась равной  $v/2a = 2.5$ . Отсюда, коэффициент температуропроводности медной проволоочки  $a = 1.2 \text{ см}^2/\text{с}$  при скорости распространения пламени  $6 \text{ см}/\text{с}$ . Полученная величина  $a$  хорошо согласуется с табличным значением температуропроводности для меди –  $a = 1.1 \text{ см}^2/\text{с}$ . Это означает, что продольная передача тепла по подложке является основным тепловым процессом в предпламенном разогреве горючего и его испарении. При испарении жидкости, вблизи поверхности  $k$ -фазы, образуется стехиометрическая смесь паров горючего с воздухом, способная к саморазогреву за счет газозафазной химической реакции окисления. В результате формируется температурный профиль, распространяющийся по газу в виде тепловой волны. Понятно, что возникновение волны горения и ее скорость определяются условиями, существующими в реакционной смеси в окрестности сечения слоевой системы, где температура подложки близка к  $T_{st}$ . Однако, концентрация паров горючего над пленкой жидкости определяется не только темпера-

турой підложки, но і градієнтом концентрації парів вздовж поверхності рідкої, виникаючим за рахунок градієнта температури підложки. Тому, в механізмі переносу енергії при розповсюдженні пламени по плівкам горючого, необхідно врахувати і конвективний потік тепла від дифузійного пламени.

### Література:

1. *Ефремов В. Л., Колесников Б. Я.* Исследование распределения температуры при распространении пламени по поверхности отвержденной эпоксидной смолы // *Материалы VI Всесоюзного Симпозиума по горению и взрыву.* – Черногоровка. – 1980.
2. *Рыбанин С. С., Соболев С. Л.* Скорость и пределы горения конденсированного вещества при теплообмене с инертной средой. – 1988, Черногоровка // *Препр./РАН. ОНХФ.* – № 993.
3. *Головко В. В., Баронецкий В. К., Копейка А. К.* Распространение пламени по тонким пленкам жидкого топлива на металлических подложках // *Физика аэродисперсных систем.* – 2005, № 42. – С. 76 – 85.
4. *Головко В. В., Баронецкий В. К., Величко А. А., Копейка А. К., Иссаев Д. И.* Распространение диффузионного пламени по пленкам горючего на металлических подложках // *Физика аэродисперсных систем.* – 2007, № 44. – С. 78 – 84.
5. *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.* – Т. 34, №3. – 1998. – С. 15 – 18.
6. *Мержанов А. Г., Хайкин Б. И.* Теория волн горения в гомогенных средах. ИСМ РАН, Черногоровка. –1992. –160 с.
7. *Варгафтик Н. Б.* Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. – Наука, 1972.
8. *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 г – Т. 36, №5 – С. 12 – 21.

### **Головко В.В., Баронецкий В.К.**

#### **Розігрів підложки при розповсюдженні полум'я по плівці палива**

#### АННОТАЦІЯ

*Досліджено механізм перенесення енергії при поширенні дифузійного полум'я по тонких плівках етанолу, що нанесені на мідний дріт. Показано, що в передполум'яний період розігрів горючого та його випаровування забезпечується поздовжньою передачею тепла по підкладці. Кромка факелу розташовується там, де температура шарової системи забезпечує умови утворення в газовій фазі, поблизу до поверхні плівки, горючої суміші стехіометричного складу.*

***Golovko V.V., Baronetskiy V.K.***

SUMMARY

*The energy transfer mechanism is studied in diffusion flame propagation on thin films of etha, on a copper wire. It is shown that in pre-ignition period fuel heating and evaporation are provided by the longitudinal heat transfer along the substrate. The flame edge location corresponds to formation of stoichiometric combustible mixture near the film surface at the certain temperature of the layered system.*