

## Оценка нестационарных температурных полей при формировании антикоррозионного покрытия

Л.Н. Шкаранута, Л.Л. Митрохина

Институт биоорганической химии и нефтехимии НАН Украины,  
Украина, 02094 Киев, ул. Мурманская, 1; факс: (044) 573-25-52

Проанализированы закономерности формирования температурных полей в оригинальном изоляционном покрытии.

Трудно переоценить роль распределения полей температур во времени по толщине изоляционного покрытия. Именно в зависимости от их конфигурации формируется структура полимера, оказывающая определяющее влияние на прочностные, адгезионные, диэлектрические и изоляционные свойства покрытия в целом.

Формально постановка задачи определения температурных полей в покрытии, нанесенном на трубу, предполагает анализ теплопроводности в полном многослойном цилиндре конечных размеров с граничными условиями на внутренней и внешней поверхностях, а также между слоями. Нам не известно общее решение такой задачи – слишком велики трудности, возникающие при анализе дифференциальных уравнений в частных производных. Решен ряд частных задач. Актуальным для конкретных объектов являются обоснование исходных посылок и разработка инженерных методов расчета, позволяющих упростить решение задачи нестационарной теплопроводности и получить результаты, хорошо согласующиеся с экспериментом. В этой связи разработка метода оценки распределения температурных полей в оригинальном экструдированном покрытии [1] задача, несомненно, актуальная.

При рассмотрении распределения температур по толщине покрытия представляется оправданным отказаться от учета кривизны поверхности трубы. Действительно, как следует из рис. 1, при значительном превышении величиной радиуса покрытия ( $R_2$ ) его толщины ( $R_2 - R_1$ ) практически исчезает различие между геометрией “плоской” пластины AEDC и исходной ( $EB = \alpha(R_2 - R_1)$ ;  $EB/AB = \alpha(R_2 - R_1)/\alpha R_2 = 1 - R_1/R_2$ ). Например, для трубы диаметром 0,72 м EB не превышает 0,83 % AB).

Для плоской неограниченной пластины клея-расплава (КРА) толщиной  $2d$  (рис. 2), с начальной температурой  $T_0$ , мгновенно помещенной в среду с температурой  $T_c$  ( $T_c < T_0$ ), при условии теплообмена по закону Ньютона (граничное условие третьего рода) уравнение теплопроводности совместно с начальным и граничным условиями имеет вид

$$\frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad (1)$$

$$T(x, 0) = T_0, \quad (2)$$

$$\lambda \frac{\partial T(d, \tau)}{\partial x} = \alpha [T(d, \tau) - T_c], \quad (3)$$

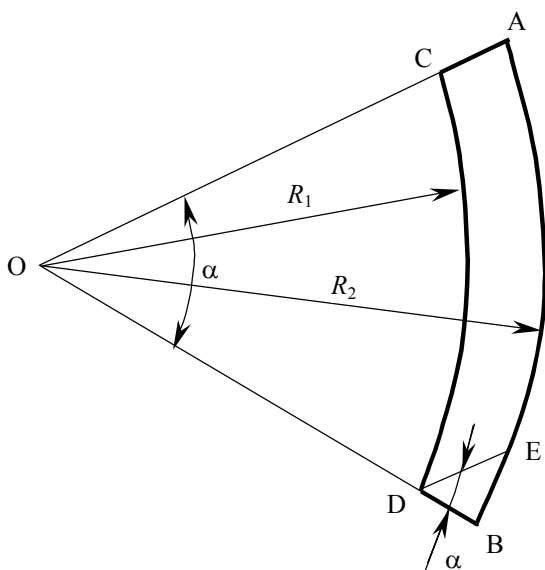


Рис. 1. Сегмент покрытия

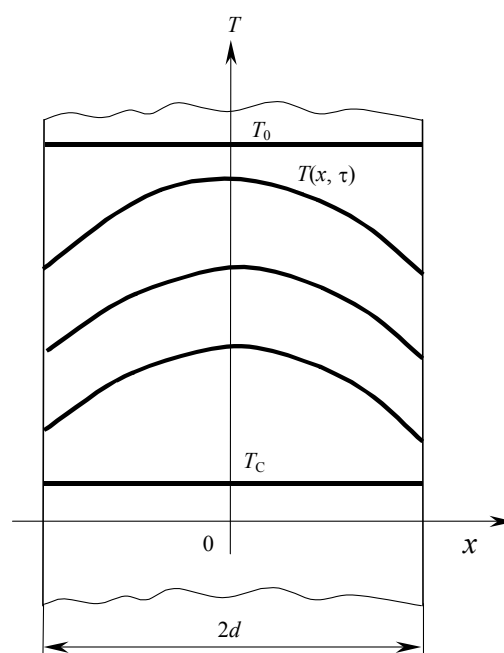


Рис. 2. Расчетная схема

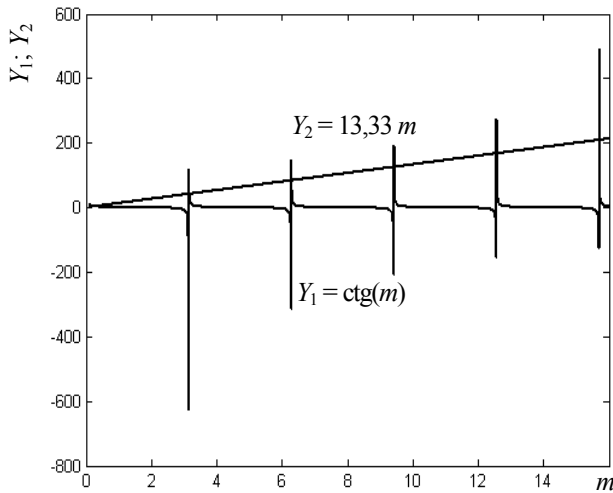


Рис. 3. Оценка первых шести корней уравнения  $\text{ctg}(m) = 13,33 m$

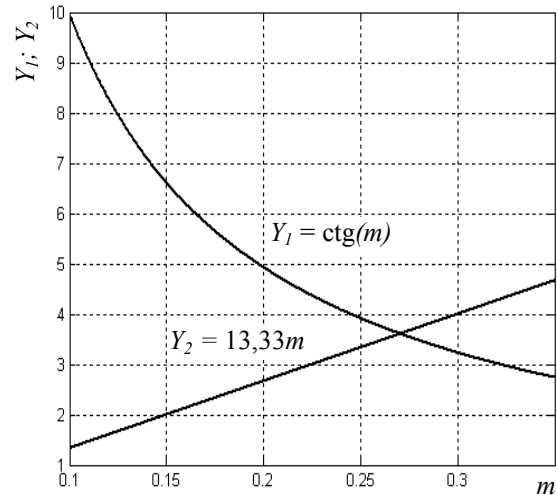


Рис. 4. Определение первого корня уравнения

$$\lambda \frac{\partial T(-d, \tau)}{\partial x} = -\alpha [T(-d, \tau) - T_c], \quad (4)$$

где:  $T(x, \tau)$  – текущая температура;  $x$  – продольная координата;  $\tau$  – время;  $c$ ;  $a$  – коэффициент температуропроводности;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи.

В общем виде решение уравнений (1) – (4) будет [2]:

$$T(x, \tau) = T_0 - (T_0 - T_c) \times \left[ 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \sin(m_n)}{m_n + \sin(m_n) \cos(m_n)} \times \cos(m_n \frac{x}{d}) \exp(-m_n^2 \frac{a}{d^2} \tau) \right] \quad (5)$$

аргументы  $m_n$  являются корнями уравнения

$$\text{ctg}(m) = m \lambda / \alpha d. \quad (6)$$

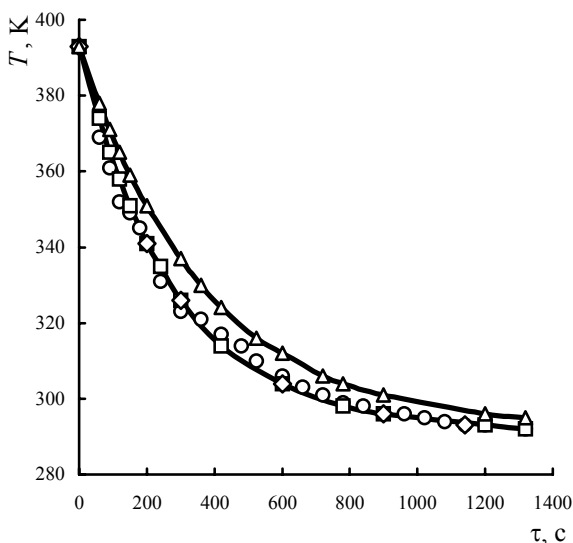


Рис. 5. Распределение температур во времени на поверхности образца КРА: (o – эксперимент; □ – расчет по формуле (5); ◇ – расчет по формуле (8)) и полиэтилена (Δ – расчет по формуле (5))

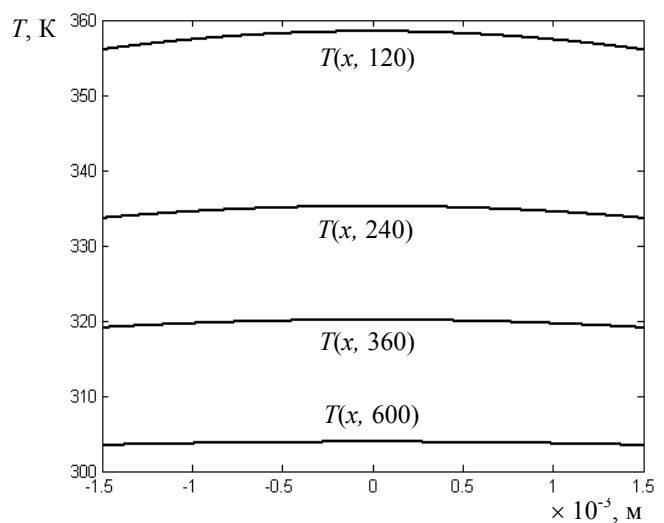


Рис. 6. Распределение температур во времени по толщине образца КРА

Ранее [3] было показано, что для разработанного нами КРА  $\lambda = 0,2 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ;  $a = 11 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$ . Толщина образца  $d$  в эксперименте составляла  $3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ; величина коэффициента теплоотдачи была принята равной  $10 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$  (теплопотери за счет лучеиспускания и конвекции [4]).

Корни выражения  $\text{ctg}(m) = 13,33 m$  определены графически как пересечение кривой  $Y_1 = \text{ctg}(m)$  и прямой  $Y_2 = 13,33 m$ , рис. 3, 4. Используя первые шесть корней ( $m_1 = 0,2706$ ;  $m_2 = 3,1653$ ;  $m_3 = 6,2950$ ;  $m_4 = 9,4325$ ;  $m_5 = 12,5722$ ;  $m_6 = 15,7119$ ) рассчитали зависимость температуры поверхности образца от времени при  $T_0 = 393 \text{ К}$  и  $T_c = 312 \text{ К}$  (рис. 5). Там же приведены результаты экспериментального бесконтактного определения температуры поверхности образца КРА (пирометр “Нимбус-П+”).

Хорошее совпадение результатов расчета и эксперимента при анализе изменения во времени температуры на поверхности образца ограниченных размеров (пластина шириной 0,02, длиной 0,15 и толщиной 0,003 м соответственно) свидетельствует о возможности использования модели неограниченной пластины (5) для оценки распределения температурных полей в КРА. Отметим, что последний наносили на стальную пластинку толщиной  $0,4 \cdot 10^{-3}$  м ( $\lambda = 75$  Вт/(м·К);  $a = 20,9 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с;  $c = 0,46$  кДж/(кг·К);  $\rho = 7,8 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>;  $m = 0,005164$ ). Расчет изменений температуры во времени на поверхности пластины показал существенное различие времен выхода на стационарный режим температуры металла и полимера.

Проанализирован вклад слагаемых выражения (5) как функции корней уравнения (6). Оказалось, что при расчете температуры в центре образца (на 120-й секунде) первое слагаемое равно 0,6586, а второе и третье  $4,27 \cdot 10^{-28}$  и  $3,56 \cdot 10^{-104}$  соответственно. Таким образом, оправдано использование лишь первого слагаемого ( $m_1 = 0,2706$ ).

Для различных моментов времени было определено распределение температур по толщине образца КРА (рис. 6). Из рисунка следует, что по сечению образца градиент температур практически отсутствует, другими словами

$$\frac{d(x, \tau)}{dx} = (T_0 - T_c) \frac{2 \sin(m_1)}{m_1 + \sin(m_1) \cdot \cos(m_1)} \times \quad (7)$$

$$\times \frac{m_1}{d} \sin\left(\frac{m_1}{d} x\right) \exp\left(-\frac{m_1^2 a}{d^2} \tau\right) = 0.$$

Очевидно выражение (7) равно нулю лишь при условии  $\sin(m_1 x/d) = 0$ . Иначе  $(m_1 x/d) = 0 + 2\pi n$ . Тогда с учетом того что множитель  $2 \sin(m)/(m + \sin(m) \cdot \cos(m))$  практически не отличается от единицы (равен 1,012), выражение для расчета распределения температур образца во времени может быть представлено соотношением

$$T(\tau) = T_c + (T_0 - T_c) \exp\left(-\frac{m^2 a}{d^2} \tau\right). \quad (8)$$

Все расчеты выполняли с помощью процедур MATLAB R12. Например, файл, использованный при расчете кривых, изображенных на рис. 5, имеет вид:

$m = 0,2082$ ;  $m_1 = 0,2706$ ;  $x = 0,0015$ ;  $x_1 = 0,0015$ ;  
 $\tau = [0 \ 1 \ 1,5 \ 2 \ 2,5 \ 3 \ 3,5 \ 4 \ 4,5 \ 5 \ 6 \ 7 \ 8 \ 9 \ 10 \ 11 \ 12 \ 13 \ 14 \ 15 \ 16 \ 17 \ 18 \ 19 \ 20 \ 22] \cdot 60$ ;

$a = (2 \cdot \sin(m))/(m + \sin(m) \cdot \cos(m))$ ;

$a_1 = (2 \cdot \sin(m_1))/(m_1 + \sin(m_1) \cdot \cos(m_1))$ ;

$T_0 = 393$ ;  $T_c = 292$ ;  $d = 0,0015$ ;  $d_1 = 0,0015$ ;

$T = T_0 - (1 - (a \cdot \cos(m \cdot x/d)) \cdot \exp(-m^2 \cdot 0,062 \cdot \tau)) \cdot (T_0 - T_c)$ ;

$T_1 = T_0 - (1 - (a \cdot \cos(m_1 \cdot x/d_1)) \cdot \exp(-m_1^2 \cdot 0,049 \cdot \tau)) \cdot (T_0 - T_c)$ ;

$T_2 = [120 \ 96 \ 88 \ 79 \ 76 \ 72 \ 64 \ 58 \ 54 \ 50 \ 48 \ 44 \ 41 \ 37 \ 33 \ 30 \ 28 \ 26 \ 25 \ 23 \ 23 \ 22 \ 21 \ 20 \ 20 \ 22] + 273$ ;

$T_3 = T_0 - (T_0 - T_c) \cdot (1 - \exp(-0,00358 \cdot \tau))$ ; plot( $\tau, T_1, '-', \tau, T_2, '-', \tau, T_3, '-'$ );

Рис. 5 иллюстрирует идентичность решений, полученных по соотношениям (5) и (8).

Покрывтие [1] включает помимо КРА и слой полиэтилена низкой плотности. Исходя из его теплофизических характеристик ( $\lambda = 0,34$  Вт/(м·К);  $a = 14 \cdot 10^{-8}$  м<sup>2</sup>/с;  $c = 2,2$  кДж/(кг·К);  $\rho = 0,92 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>), был определен первый корень характеристического уравнения  $m_l = 0,2082$  и по уравнению (8) рассчитана температура образца полиэтилена толщиной  $1,5 \cdot 10^{-3}$  м (рис. 5). Полученное распределение температур близко к полученному ранее для КРА. Различие между температурами поверхностей образца полиэтилена и КРА ( $T_n - T_{кра}$ ) приведено на рис. 7.

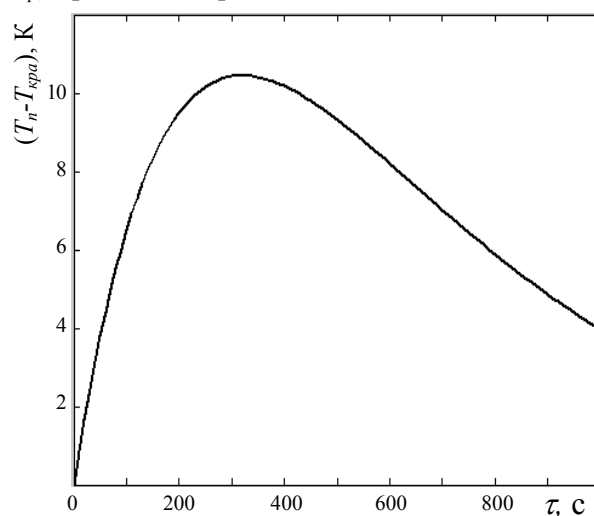


Рис. 7. Изменение разности температур поверхностей образцов полиэтилена и КРА во времени

Оно достигает максимального значения (10,45 К) при  $\tau = 317,46$  с (корень уравнения  $d(T_n - T_{кра})/d\tau = (T_0 - T_c) \cdot [0,0027 \exp(-0,0027\tau) - 0,00358 \exp(-0,00358\tau)] = 0$ ), что не превышает 3,3 % температуры поверхности образца КРА. Таким образом, при анализе нестационарного охлаждения покрытия [1] оправдано рассмотрение двухслойной конструкции КРА – полиэтилен как однородной массы с использованием модели (8).

Уравнение (6) можно представить в виде  $\alpha d/\lambda = m \operatorname{tg}(m)$ , а так как при малых  $m \operatorname{tg}(m) \cong m$ , то  $\alpha d/\lambda = m^2$  (9)

Из выражений (8) и (9) следует, что в рассматриваемом нами случае интенсивность охлаждения для заданной разности  $T_0$  и  $T_c$

$$\frac{dT(x, \tau)}{d\tau} = (T_0 - T_c) \frac{\alpha}{\rho c d} \exp\left(-\frac{m^2 a}{d^2} \tau\right)$$

прямо пропорциональна коэффициенту теплообмена и обратно пропорциональна характерному размеру ( $d$ ) покрытия. Иначе, скорость охлаждения определяется скоростью переноса тепла в окружающую среду и не зависит от скорости переноса тепла через пограничный слой.

Полученные соотношения позволяют дать достаточно надежную оценку распределения температурных полей при нанесении оригинального покрытия и найти влияние температуры на параметры покрытия.

1. Шкарапута Л.Н., Митрохина Л.Л., Морозова И.П., *Каталіз и нефтехимия*, 2005, (13), 40.

2. *Handbook of heat transfer*, 3rd ed, Ed. by M. Warren, Rohsenow, Jams P. Harnett and I. Cho Young. Publisher:

New York, NY: Mc Craw-Hill, 1997.

3. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А., *Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии*, Ленинград, Химия, 1987.

4. Алимova О.В., Шкарапута Л.Н., Митрохина Л.Л. и др., *Каталіз и нефтехимия*, 2003, (12), 36.

Поступила в редакцию 10.05.2007 г.

## Оцінка нестационарних температурних полів при формуванні антикорозійного покриття

*Л.М. Шкарапута, Л.Л. Митрохіна*

*Інститут біоорганічної хімії та нафтохімії НАН України,  
Україна, 02094 Київ, вул. Мурманська, 1; факс: (044) 573-25-52*

Досліджено закономірності формування температурних полів у оригінальному ізоляційному покритті.

## Estimation of the non-steady temperature fields at anticorrosive coating forming

*L.M. Shkaraputa, L.L. Mitrokhina*

*Institute of Bioorganic Chemistry and Petrochemistry of NAS of Ukraine,  
1, Murmanskaya Str., Kyiv, 02094, Ukraine, Fax: (044) 573-25-52*

Regularities of the temperature fields forming in original isolating coating have been analyzed.