

Г. Б. АНДРЕЕВ, Л. И. ЖЕМКОВ

## К ЗАДАЧЕ О ТЕПЛОБМЕНЕ ПРИ СУБЛИМАЦИИ

В ряде случаев тепло- и массообмена предметом рассмотрения является определение коэффициента теплоотдачи при нагреве тела, с поверхности которого происходит сублимация в окружающую среду.

В настоящее время решено много различных задач такого типа, однако, нестационарные случаи являются чрезвычайно сложными в математическом отношении и между теоретическим анализом и инженерным применением результатов существует значительный разрыв.

В связи с этим имеют ценность любые методы, дающие возможность быстро и с достаточной точностью определить коэффициент теплоотдачи. Особенно ценными были бы методы, основанные на автокалориметрировании, т. е. на использовании закономерностей температурного поля в теле во время нестационарного процесса.

Покажем, что можно предложить такой метод, используя некоторые особенности стабилизированного процесса массообмена при нестационарной теплопроводности. Этот этап общего процесса характерен тем, что температура поверхности тела в результате стабилизации сублимации приобретает почти постоянную величину, близкую к температуре окружающей среды.

По мере прогрева тела поле температур становится более равномерным, температура центра тела приближается к температуре поверхности. Если пользоваться критерием неравномерности температурного поля, то, очевидно,  $\psi \rightarrow 1$ .

Характерно, что при наличии сублимации стремление температурного поля к равномерному наблюдается необязательно при  $Bi \rightarrow Bi_{\text{ши}}$ , но фиксируется и при достаточно больших  $Bi$ , более того, для тел малых размеров длительность установления стабилизации массообмена может оказаться одного порядка с длитель-

ностью всего процесса и тогда тело полностью сублимирует в неустойчивом режиме.

Рассмотрим тело простой геометрии, например, шар, с поверхности которого происходит сублимация. При достаточных размерах тела процесс будет достаточно длительным для выравнивания температуры и, кроме того, объем тела и его поверхность значительно не изменятся, так что можно будет считать приближенно, что

$$V = \text{idem.} \quad (1)$$

$$F = \text{idem.}$$

Это также дает возможность не рассматривать внешней задачи, так как значительное изменение размеров тела неизменно потребовало бы учета переменных внешних гидродинамических условий. Учитывая выравнивание температурного поля в теле, можно в итоге перейти от уравнения в частных производных к обыкновенному дифференциальному уравнению, так как в любой точке тела:

$$t = t(\tau). \quad (2)$$

Тепловой баланс для рассматриваемого случая имеет вид:

$$G \cdot e \frac{dt}{d\tau} = g_c(\tau) + Fz(\tau) [t_s(\tau) - t_f]. \quad (3)$$

Или так:

$$\frac{dt}{d\tau} + \frac{F \cdot z(\tau)}{G \cdot e} \cdot t_f = \frac{g_c(\tau)}{G \cdot e} + \frac{F \cdot z(\tau)}{G \cdot e} + \frac{F \cdot z(\tau)}{G \cdot e} \cdot t_s(\tau). \quad (4)$$

Следуем далее методике анализа, предложенной в [1].

Обозначив:

$$\frac{F \cdot z(\tau)}{G \cdot e} = Z(\tau). \quad (5)$$

или:

$$\frac{F \cdot z(t)}{G \cdot e} = Z(t). \quad (6)$$

и

$$\frac{g_c(\tau)}{G \cdot e} + \frac{F \cdot z(\tau)}{G \cdot e} \cdot t(\tau) = Z_0(\tau) \quad (7)$$

или

$$\frac{g_c(t)}{G \cdot e} + \frac{F \cdot z(t)}{G \cdot e} \cdot t(\tau) = Z_0(t, \tau), \quad (8)$$

получим уравнение:

$$\frac{dt}{d\tau} + t \cdot z(\tau) + z_0(\tau) = 0, \quad (9)$$

или

$$\frac{dt}{d\tau} + t \cdot z(t) + z_0(t, \tau) = 0. \quad (10)$$

Уравнения (9) и (10) — приведенные к канонической форме уравнения с переменными коэффициентами.

Интеграл уравнения (9) имеет вид:

$$t = e^{\int -z(\tau) d\tau} \left( c - \int z_0(\tau) e^{\int z(\tau) d\tau} \cdot d\tau \right) \quad (11)$$

Решение (11) можно использовать для случая стабилизированной сублимации. Из (11) можно, например, определять коэффициент теплоотдачи  $\alpha$ .

Для случая  $F = \text{idem}$ ,  $q_c = \text{const}$ ,  $t_c = \text{const}$ ,  $z = \text{const}$  можно использовать более простое соотношение:

$$\frac{t - t_c - \Theta_{m_0}}{t_0 - t_c - \Theta_{m_0}} = e^{-z(\tau - \tau_0)} \quad (12)$$

Здесь

$$z = \frac{F \cdot \alpha}{G \cdot c}$$

$$\Theta_{m_0} = \frac{q_c}{F \cdot \alpha}$$

$t_c$  — температура среды;

$\tau_0$  — начало отсчета времени.

Из соотношения (12) видно, что в данном случае наблюдается своеобразный регулярный режим для величины:

$$v = t - t_c^* \quad (13)$$

$$t_c^* = t_c + \Theta_{m_0} \quad (14)$$

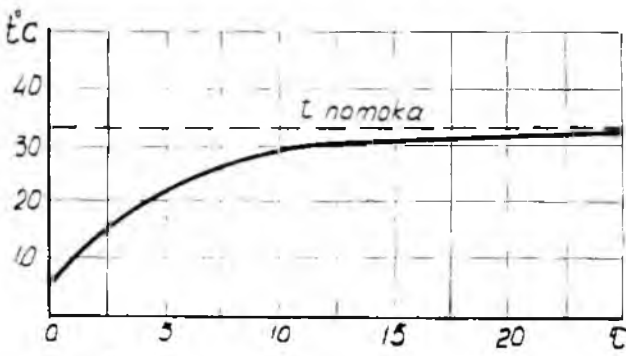
Из соотношения (12) получаем, что логарифм избыточной величины (13) линейно зависит от времени:

$$\ln(t - t_c^*) = -z(\tau - \tau_0) + c \quad (15)$$

Отсюда следует соотношение для  $z$ , как для „темпа“ этого процесса:

$$z = \frac{\ln(t - t_c^*)_1 - \ln(t - t_c^*)_2}{\tau_2 - \tau_1} = \frac{F \cdot \alpha}{G \cdot c} \quad (16)$$

Значение  $z$  совпадает с формулой для темпа температурного регулярного режима  $m$  в случае, когда  $\chi \approx 1$ .



фиг. 1.

Поскольку коэффициент теплоотдачи входит и в левую и в правую часть уравнения (12), для его определения нужно использовать какой-либо из методов решения трансцендентных уравнений.

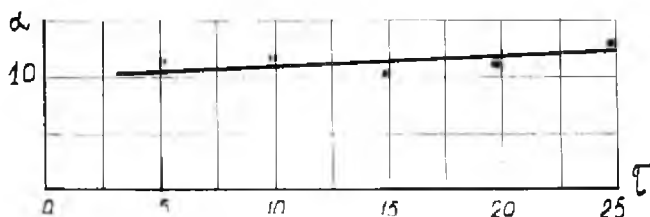
Авторами были проведены эксперименты по теплообмену сублимирующего шара из прессованного нафталина в потоке нагретого воздуха. Поток воздуха нагревался в калорифере до  $50 \div 100^\circ\text{C}$ . Температура воздуха в течение опыта была неизменной. Скорость воздуха и его температура варьировались в опытах.

В качестве иллюстрации методики определения коэффициента теплоотдачи был обработан один типичный опыт.

На фиг. 1 показан график изменения температуры шара, а на фиг. 2 — значение коэффициента теплоотдачи в функции времени, полученное при обработке опытных данных с помощью соотношения (12).

Результат показывает, что коэффициент теплоотдачи медленно увеличивается, очевидно, стабилизируясь по мере стабилизации массообмена.

Характер поведения  $\alpha$  подтверждает принятое при выводе (12) допущение  $\alpha \approx \text{const}$ .



Фиг. 2.

## ВЫВОДЫ

На основе закономерностей стабилизированного массообмена предложен метод определения коэффициента теплоотдачи в этих условиях.

## ЛИТЕРАТУРА

И. Е. В. Кудрявцев, И. В. Шумаков, К. Н. Чакалев. «Нестационарный теплообмен», АН СССР, 1961.