

УДК 621.1.016

Б. Б. Потехин<sup>1</sup>

## **ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ТЕПЛООБМЕНА ДВУХФАЗНЫХ СРЕД В ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТАХ СМЕСИТЕЛЬНОГО ТИПА**

---

---

*Предлагается аналитический метод расчета интенсивности теплообмена испаряющихся капель, распыленных форсунками в газообразной среде с учетом режима их движения. В рабочей зоне камеры теплообменного аппарата смесительного типа капля последовательно проходит нестационарный и затем стационарный участки движения. Следовательно, необходимо определить количество тепла, принятого каплей, на каждом участке отдельно. Принимая, что в результате теплообмена капли с потоком воздуха в пределах камеры её диаметр остаётся неизменным, можно определить затраты тепла на различных участках движения. Такой подход к расчету интенсивности теплообмена позволяет полученные расчетные выражения использовать для любой конструкции теплообменной смесительной камеры и количества рабочих зон в ней.*

**Ключевые слова:** теплообмен, коэффициент теплоотдачи, критериальные уравнения, режим движения, теплообменные аппараты, испаряющиеся капли, противоток.

Интенсивность теплообмена капель в теплообменных аппаратах смесительного типа (газ-жидкость) при установившемся движении в настоящее время может быть определена из известных критериальных уравнений, полученных при обработке опытов, в основном, с испаряющимися каплями.

Для процессов конвективного теплообмена при испарении капель широко известна формула Д.Н. Вырубова<sup>2</sup> для диапазона  $Re = 200 - 3000$  :

$$Nu = 0,54 Re^{0,5} \quad (1)$$

---

<sup>1</sup> © Борис Борисович Потехин, кандидат технических наук, доцент кафедры Сервиса и технической эксплуатации автомобилей ИМБЭ Владивостокского государственного университета экономики и сервиса, ул. Гоголя, 41, г. Владивосток, Приморский край, 690014, Россия, E-mail: Boris.Potekhin1@vvsu.ru, тел.: +74232404027.

<sup>2</sup> Сб. Тепло - массоперенос. Т.5, ч.2, Наукова думка, Киев, 1972. - С. 236-240.

## I. ТЕОРИЯ – ПРАКТИКЕ

Для этих условий может быть использована зависимость, предложенная Л.С. Клячко:

$$Nu = 2 + 0,18 Re^{0,66} \quad (2)$$

Более ограниченную область применения имеет расчётная зависимость Н. Фресслинга ( $Re = 0 - 50$ ):

$$Nu = 2 + 0,276 Re^{0,5} \quad (3)$$

Для диапазона числа Рейнольдса ( $Re = 0,7 - 200$ ), в котором, как правило, работают аппараты смесительного типа, известно выражение А.П. Сокольского и Ф.А. Тимофеевой:

$$Nu = 2 + 0,16 Re^{0,67} \quad (4)$$

Движение капли на нестационарном участке с переменной скоростью сопровождается теплообменом с постепенно понижающейся интенсивностью, коэффициент теплоотдачи уменьшается из-за торможения. Предлагается учитывать переменность величины коэффициента теплоотдачи следующим способом.

Используя в дальнейшем уравнение Сокольского и Тимофеевой<sup>1</sup>(4), представим его в следующем виде:

$$\alpha = \alpha_0 + a V_{отн}^{0,67} \quad (5)$$

где  $\alpha$  - коэффициент теплоотдачи от газообразной среды к капле;

$V_{отн}$  - скорость движения капли относительно газообразной среды;

$$\alpha_0 = \frac{2\lambda_{см}}{d_{к0}} - \text{коэффициент теплоотдачи к капле при минимальной}$$

интенсивности процесса ( $Nu = 2$ ):

$$\alpha = 0,16 \frac{\lambda_{см}}{V_{см}^{0,67} d_{к0}^{0,33}}$$

Величина относительной скорости  $V_{отн}$ , в свою очередь, может быть предоставлена в виде функции  $V_{отн}(\tau)$ .

Однако эта функция, является слишком сложной и не представляется в явном виде. Зависимость  $V_{отн}$  от  $\tau$  может быть представлена графически, по результатам предварительного расчёта. По графику  $V_{отн} - \tau$  (принимая  $V_{отн} = V_y$  с допустимой погрешностью для

<sup>1</sup> Межвузовский сборник: Эффективность теплоэнергетических процессов. Вып.1, ДВГУ, Владивосток.1976. С.60-63.

капли нижней части факела форсунки) подбирается степенная функция вида

$$V_{отн} = b\tau^{-n} \quad (6)$$

удовлетворительно совпадающая с первоначальной ( $b$  - постоянная,  $n$  - показатель степени).

Подставив (6) в (5), выразим зависимость коэффициента теплоотдачи капли от времени её движения в следующем виде:

$$\alpha = \alpha_0 + c\tau^{-0,67n} \quad (7)$$

где  $c = ab^{0,67}$ .

Текущее значение поверхности капли при частичной конденсации на ней пара получим с помощью закона В. Срезневского

$$\frac{df}{d\tau} = -const \quad (8)$$

который справедлив и для случая конденсации на поверхности капли.

Тогда:

$$f = -const\tau + c \quad (9)$$

при  $\tau = 0$ ;  $f = f_0$ ;  $f_0 = -const \cdot 0 + c$ ;  $f_0 = c$ ;

при  $\tau = \tau_{имтеку}$ ;  $f = f_{текущ}$ ;  $f_{текущ} = const\tau_i + f_0$ ;

$$f_{текущ} = -k\tau_i + f_0 \quad (10)$$

Отсюда:

$$k = -\frac{f_{текущ} - f_0}{\tau_{нест}}, \quad (11)$$

Где,  $\tau_{нест}$  - полное время нестационарного движения в пределах рабочей зоны до достижения ею скорости витания при установившемся режиме:

$$k = -\frac{\pi(d_{ki}^2 - d_{k0}^2)}{\tau_{нест}}.$$

Тогда (10) запишем как:

$$f_{текущ} = f_0 + k\tau_i \quad (13)$$

Уравнение теплообмена капли в дифференциальной форме на нестационарном участке движения имеет вид:

$$dq_{нест} = \alpha(\tau)f(\tau)\Delta t_{ср.лог} dt \quad (14)$$

где  $\Delta t_{ср.лог}$  - средне логарифмическая разность температур между воздухом и каплей.

Используя (7) и (13), проинтегрируем (14):

$$\begin{aligned}
 \int_0^q dq_{\text{нест}} &= \int_0^{\tau_{\text{нест}}} (\alpha + c\tau^{-0,67n})(f_0 + k\tau_i)\Delta t_{\text{ср.лог}} d\tau = \\
 &= \int_0^{\tau_{\text{нест}}} \alpha_0 f_0 \Delta t_{\text{ср.лог}} d\tau + \int_0^{\tau_{\text{нест}}} \alpha_0 k \tau_i \Delta t_{\text{ср.лог}} d\tau + \\
 &+ \int_0^{\tau_{\text{нест}}} c \tau^{-0,67n} f_0 \Delta t_{\text{ср.лог}} d\tau + \int_0^{\tau_{\text{нест}}} c \tau^{-0,67n} k \tau_i \Delta t_{\text{ср.лог}} d\tau = \\
 &= \alpha_0 f_0 \Delta t_{\text{ср.лог}} \tau_{\text{нест}} + \alpha_0 \Delta t_{\text{ср.лог}} \int_0^{\tau_{\text{нест}}} k \tau_i d\tau + \quad (15) \\
 &+ c f_0 \Delta t_{\text{ср.лог}} \int_0^{\tau_{\text{нест}}} \tau^{-0,67n} d\tau + c \Delta t_{\text{ср.лог}} \int_0^{\tau_{\text{нест}}} k \tau^{1-0,67n} d\tau = \\
 &= \alpha_0 f_0 \Delta t_{\text{ср.лог}} \tau_{\text{нест}} + \alpha_0 \Delta t_{\text{ср.лог}} k \frac{k_{\text{нест}}^2}{2} + \\
 &+ c f_0 \Delta t_{\text{ср.лог}} \frac{\tau_{\text{нест}}^{1-0,67n}}{1-0,67n} + c \Delta t_{\text{ср.лог}} k \frac{\tau_{\text{нест}}^{2-0,67n}}{2-0,67n}.
 \end{aligned}$$

Преобразуем выражение (15), используя следующие зависимости:

$$K = \frac{\pi(d_{ka}^2 - d_{ko}^2)}{\tau_{\text{нест}}}; \quad c = ab^{0,67},$$

$$\alpha = 0,16 \frac{\lambda_{\text{см}}}{v_{\text{см}}^{0,67} \cdot d_{ko}^{0,33}},$$

$$\alpha_0 = \frac{2\lambda_{\text{см}}}{d_{ko}}; \quad f_0 = \pi d_{ko}^2,$$

$$P = \frac{0,08b^{0,67} d_{ko}^{0,67}}{(1-0,67n)v_{\text{см}}^{0,67}}.$$

Преобразования произведём по каждому члену уравнения (15):

первый член уравнения:

$$\alpha_0 f_0 \Delta t_{\text{ср.лог}} \tau_{\text{нест}} = q_0;$$

второй член:

$$\begin{aligned} \alpha_0 \Delta t_{\text{ср.лог}} k \frac{\tau_{\text{нест}}^2}{2} &= \alpha_0 - \Delta t_{\text{ср.лог}} \left[ -\frac{\pi(d_{k1}^2 - d_{k0}^2)}{\tau_{\text{нест}}} \right] \frac{\tau_{\text{нест}}^2}{2} = \\ &= \alpha_0 \Delta t_{\text{ср.лог}} \frac{\tau_{\text{нест}}^2}{2} \left( 1 - \frac{d_{k1}^2}{d_{ko}^2} \right) \pi d_{ko}^2 = \alpha_0 \Delta t_{\text{ср.лог}} f \frac{\tau_{\text{нест}}}{2} \left( 1 - \frac{d_{k1}^2}{d_{ko}^2} \right) = \\ &= \frac{q_0}{2} \left( 1 - \frac{d_{k1}^2}{d_{ko}^2} \right); \end{aligned}$$

третий член:

$$\begin{aligned} cf_0 \Delta t_{\text{ср.лог}} \frac{\tau_{\text{нест}}^{1-0,67}}{1-0,67n} &= cf_0 \Delta t_{\text{ср.лог}} \frac{\tau_{\text{нест}} \cdot \tau_{\text{нест}}^{-0,67}}{1-0,67n} = \\ &= f_0 \Delta t_{\text{ср.лог}} \tau_{\text{нест}} ab^{0,67} \frac{\tau_{\text{нест}}}{1-0,67n} = f_0 \Delta t_{\text{ср.лог}} \tau_{\text{нест}} \frac{2\lambda_{\text{ст}}}{d_{ko}} \times \\ &\times 0,08 \frac{d_{ko}^{0,67} \cdot b^{0,67}}{v_{\text{ст}}^{0,67} (1-0,67n)} \tau_{\text{нест}}^{-0,67} = f_0 \Delta t_{\text{ср.лог}} \alpha \tau_{\text{нест}} P \cdot \tau_{\text{нест}}^{-0,67} = q_0 P \tau_{\text{нест}}^{-0,67}; \end{aligned}$$

четвёртый член:

$$\begin{aligned} c \Delta t_{\text{ср.лог}} k \frac{\tau_{\text{нест}}^{2-0,67n}}{2-0,67n} &= \Delta t_{\text{ср.лог}} ab^{0,67} \left[ \frac{\pi(d_{ka}^2 - d_{ko}^2)}{\tau_{\text{нест}}} \right] \frac{\tau_{\text{нест}} \cdot \tau_{\text{нест}}^{1-0,67}}{2-0,67n} = \\ &= \Delta t_{\text{ср.лог}} \tau_{\text{нест}} f_0 \left( 1 - \frac{d_{k1}^2}{d_{ko}^2} \right) \frac{0,08 b^{0,67} d_{ko}^{0,67}}{v_{\text{ст}}^{0,67} (1-0,67n)} \cdot \frac{1-0,67n}{2-0,67n} \cdot \frac{2\lambda_{\text{ст}}}{d_{ko}} \tau_{\text{нест}}^{1-0,67} = \\ &= q_0 P \tau_{\text{нест}}^{-0,67} \frac{1-0,67n}{2-0,67n} \left( 1 - \frac{d_{k1}^2}{d_{ko}^2} \right). \end{aligned}$$

Используя полученные значения, вновь запишем (15):

$$\begin{aligned} q_{\text{нест}} &= q_0 + \frac{q_0}{2} \left( 1 - \frac{d_{k1}^2}{d_{ko}^2} \right) + q_0 P \tau_{\text{нест}}^{-0,67} + \\ &+ q_0 P \tau_{\text{нест}}^{-0,67} \frac{1-0,67n}{2-0,67n} \left( 1 - \frac{d_{k1}^2}{d_{ko}^2} \right) = \\ &= q_0 \left\{ 1 + P \tau_{\text{нест}}^{-0,67} \left[ 1 + \frac{1-0,67n}{2-0,67n} \left( 1 - \frac{d_{k1}^2}{d_{ko}^2} \right) \right] + 0,5 \left( 1 - \frac{d_{k1}^2}{d_{ko}^2} \right) \right\}. \end{aligned}$$

Расчётное выражение для определения интенсивности теплообмена на нестационарном участке движения имеет вид:

$$q_{нест} = q_0 \left\{ 1 + P \tau_{нест}^{-0,67} \left[ 1 - \frac{1-0,67n}{2-0,67n} \left( \frac{d_{k1}^2}{d_{ko}^2} - 1 \right) \right] + 0,5 \left( 1 - \frac{d_{k1}^2}{d_{ko}^2} \right) \right\} \quad (16)$$

В результате движения в рабочей зоне камеры капля последовательно проходит нестационарный и затем стационарный участки движения.

Следовательно, необходимо определить количество тепла, воспринятого каплей, на каждом участке отдельно. Принимая что в результате теплообмена капли с потоком воздуха в пределах камеры её диаметр остаётся неизменным, можно определить затраты тепла на различных участках движения:

$$\begin{aligned} q_{нагр1} &= \frac{\pi \rho_{жс}}{6} d_{ko}^3 c_{жс} (t_k^1 - t_k^h), \\ q_{нагр2} &= \frac{\pi \rho_{жс}}{6} d_{k1}^3 c_{жс} (t_k^k - t_k^1), \end{aligned} \quad (17)$$

где  $q_{нагр1}$  и  $q_{нагр2}$  - тепло, затраченное на нагревание капли за счёт тепла воздуха на нестационарном и стационарном;

$t_k^h, t_k^k$  - начальная и конечная температуры капли;

$t_k^1$  - температура капли в конце нестационарного участка движения.  $q_{нест} = q_{нагр1}$ ,

$$\frac{\pi \rho_{жс}}{6} d_{ko}^3 c_{жс} (t_k^1 - t_k^h) = q_0 \left\{ 1 + P \tau_{нест}^{-0,67} \left[ 1 - \frac{1-0,67n}{2-0,67n} \left( \frac{d_{k1}^2}{d_{ko}^2} - 1 \right) \right] + 0,5 \left( 1 - \frac{d_{k1}^2}{d_{ko}^2} \right) \right\} \quad (18)$$

и для стационарного участка движения

$$q_{стац} = q_{нагр2},$$

$$\frac{\pi \rho_{жс}}{6} d_{ko}^3 c_{жс} (t_k^1 - t_k^h) = \alpha_{стац} f_k \Delta t_{ср.лог} \tau_{внт}. \quad (19)$$

Известно, что при объёмной концентрации частиц до значения  $K = 0,35 \cdot 10^{-3}$  их взаимным влиянием на процесс можно пренебречь. Поэтому этот фактор не учитывается при вводе приведённых выше уравнений (в условиях оросительной камеры  $K < 0,35 \cdot 10^{-3}$ ).

Средне логарифмическая разность температур между каплей и потоком газа определяется для каждой зоны аппарата с многорядным расположением форсунок. Считая, что температурные условия в каждой зоне постоянны, получим

$$\Delta t_{\text{ср.лог}} = \frac{\Delta t_s - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_s}{\Delta t_m}}. (20)$$

Исходя из условий, что температура капли, которую она приобретает на выходе из каждой зоны аппарата (при многорядном расположении форсунок) на 1 -2 С<sup>0</sup> ниже температуры газа на выходе из этой зоны, можно записать выражения, определяющие температуру газа и жидкости для каждой зоны, исходя из уравнения теплового баланса. Расчетные выражения будут справедливы для любой конструкции камеры и количеством рабочих зон в ней. Учитывая интенсивности теплообмена, рекомендуется проектировать смесительные теплообменные аппараты с противотоком теплоносителей.

#### ***Библиография***

- Ильин А.К. Теплообмен при испарении и конденсации капель в парогазовой среде. / А.К. Ильин, Г.Б. Гриненко, Б.Б. Потехин - Сб. Тепло - массоперенос. - Киев: Наукова думка. 1972. Т.5, ч.2. С. 236-240.
- Ильин А.К. О расчетной формуле для теплоотдачи при нестационарном движении. / А.К. Ильин, Б.Б. Потехин - Сб. Эффективность теплоэнергетических процессов. - Владивосток: ДВГУ. 1976. Вып.1. С. 60-63.
- Потехин Б.Б. Исследование работы промышленной оросительной камеры. / Б.Б. Потехин, А.К.Ильин - Сб. Тепловые и технологические процессы. - Владивосток: Краевое Правление НТО пищевой промышленности. 1974. С. 26-37.