

01;03
©1995

ТЕПЛООБМЕН ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ПЛЕНОЧНОЙ КОНДЕНСАЦИИ ПАРА

А.Р.Дорохов, В.С.Логинов, П.Т.Петрик

Нестационарность при пленочной конденсации (ПК) может проявляться двояким образом: а) через изменение граничных условий; б) через нестационарные процессы теплообмена собственно в самой пленке конденсата.

Сам нестационарный процесс теплообмена в пленке относится к быстропротекающим процессам. Например, для хладагента R-12 при теплофизических свойствах (ТФХ): температуропроводности $a = 4.47 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$, теплопроводности $\lambda = 0.0578 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, толщине пленки $\delta \approx 5.9 \cdot 10^{-5} \text{ м}$ — характерное время проникновения тепловой волны при ступенчатом изменении температуры насыщенного пара

$$\tau = \delta^2 / \text{Па} \approx 2.5 \cdot 10^{-2} \text{ с.}$$

Это время существенно меньше реализуемых при нестационарных режимах работы реальных конденсационных устройств.

Более сложным образом проявляют себя эффекты, связанные с изменением во времени граничных условий. В квазистационарном приближении изменение любого параметра, определяющего процесс пленочной конденсации, приводит и к изменению коэффициента теплоотдачи (КТО). Например, согласно формуле Нуссельта [1], для расчета теплообмена на горизонтальной трубе КТО имеет вид

$$\alpha = 0.725 \left[\frac{\lambda^3 g (\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{п}}) r}{\nu \Delta T d} \right]^{1/4}. \quad (1)$$

Здесь такими параметрами являются: ТФХ теплоносителей, температурный напор $\Delta T = T_s - T_c$, где T_c — температура стенки. Изменение этих параметров во времени приводит к аналогичному изменению КТО.

Влияние граничных условий на КТО наиболее существенным образом сказывается через изменение $T_s(\tau)$ и $T_c(\tau)$. Темп изменения КТО может быть оценен с использованием (1) выражением

$$\frac{d\alpha}{d\tau} = -\frac{\alpha}{4} \frac{1}{\Delta T} \left(\frac{d(\Delta T)}{d\tau} \right). \quad (2)$$

Однако соотношение (2) является не вполне корректным, поскольку не учитывает влияние изменения граничных условий на определение КТО.

Рассмотрим КТО как сложную функцию

$$\alpha = \alpha(\tau, \Delta T, \lambda(\tau), \dots). \quad (3)$$

Полагая теплофизические свойства не зависящими от τ , определим производную

$$\frac{d\alpha}{d\tau} = \left(\frac{\partial \alpha}{\partial \tau} \right)_{\Delta T} + \left(\frac{\partial \alpha}{\partial \Delta T} \right)_{\tau} \frac{d(\Delta T)}{d\tau}. \quad (4)$$

При $T_c = \text{const}$ соответствие (2) и (4) имеет место, если считать $(\partial \alpha / \partial \tau)_{\Delta T} = 0$.

Проведем оценку первого слагаемого в (4). Рассмотрим изменение плотности теплового потока $q(\tau)$ на поверхности ПК при скачкообразном изменении T_s и T_c . Решение нестационарной теплопроводности ПК при граничных условиях позволяет получить для "дефекта" $\Delta q(\tau)$ на поверхности пленки выражение

$$\Delta q = \frac{\lambda}{\sqrt{\pi a \tau}} (T_{c_2} - T_{c_1} + D) \left\{ 1 - \exp \left[-\delta_2^2 / (4a\tau) \right] \right\}, \quad (5)$$

где

$$D = T_{s_2} - T_{c_1} - (T_{s_1} - T_{c_1}) \frac{\delta_2}{\delta_1}.$$

При $\delta_2 \rightarrow \delta_1$ и $T_{s_2} \rightarrow T_{s_1}$ с использованием (5) можем определить частную производную

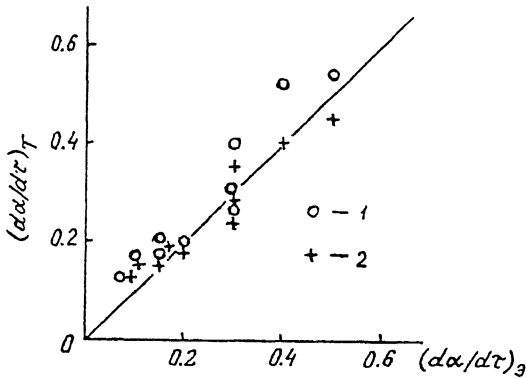
$$\left(\frac{\partial \alpha}{\partial \tau} \right)_{\Delta T} = \frac{\lambda}{\sqrt{\pi a \tau}} \cdot \frac{1}{\Delta T} \frac{dT_s}{d\tau}. \quad (6)$$

Подставляя (2), (6) в (4), получим

$$\frac{d\alpha}{d\tau} = \left(\frac{\lambda}{\sqrt{\pi a \tau}} - \frac{\alpha}{4} \right) \frac{1}{\Delta T} \frac{dT_s}{d\tau}. \quad (7)$$

Экспериментальная проверка полученных соотношений была проведена при исследовании ПК хладона R-12 на горизонтальной трубе. В стационарных условиях КТО хорошо описывается зависимостью Нуссельта (1) [2].

Исследования проводились в замкнутом объеме, в котором в нижней части проводилось испарение хладона, а в



Сравнение теоретического темпа изменения коэффициента теплоотдачи $(\frac{d\alpha}{d\tau})_7$ и экспериментального $(\frac{d\alpha}{d\tau})_3$. Точки: 1 — расчет по формуле (2); 2 — расчет по формуле (7).

паровом объеме располагались две конденсаторные трубки, на которых осуществлялась конденсация пара. Устанавливался стационарный режим работы установки при подаче охлаждающей воды (ОВ) только в одну трубку. Затем ОВ подавалась в другую трубку и фиксировалось изменение параметров теплообмена на первой трубке. Процесс измерений был полностью автоматизирован. Время одного цикла измерений составляло ~ 1.3 с. Погрешность определения КТО зависит в основном от величины ΔT , поэтому опыты выполнялись при $\Delta T > 20^\circ \text{C}$. При этом относительная ошибка в определении ΔT оценивается $\frac{\varepsilon(\Delta T)}{\Delta T} = (0.1/20) \cdot 100\% = 0.5\%$.

С учетом погрешности определения q погрешность определения КТО $\varepsilon\alpha/\alpha \approx (1 + 0.5) = 1.5\%$.

В опытах КТО изменялся в нестационарном процессе от 957 до 980 Вт ($\text{м}^2 \cdot \text{К}$), т.е. примерно на 3.5%. При этом разброс точек соответствовал полученной выше погрешности опыта.

По опытным точкам была проведена осредняющая кривая, на которой определялся темп измерения КТО.

На рисунке сопоставлены расчетные и экспериментальные значения темпа изменения КТО. При расчете по (7) имеет место лучшее согласие с экспериментом, нежели при расчете по формуле (2), которая не учитывает влияние нестационарности процесса ПК на КТО. Несмотря на относительно небольшую величину слагаемого (6), факт его влияния вполне установлен, что имеет принципиальное значение

как результат проявления нестационарности при ПК при характерных временах изменения параметров, существенно превышающих характерные времена нестационарного процесса теплопроводности в ПК.

Список литературы

- [1] *Nusselt W.* // Zeitschrift der VDI. 1916. Teil 2. N. 28. S. 569–576.
[2] *Теплообмен при пленочной конденсации и пленочном кипении в элементах оборудования АЭС / И.И. Гогонин, И.А. Шемагин, В.М. Будов, А.Р. Дорохов; Под ред. В.Е. Накорякова.* М.: Энергоатомиздат, 1993. 208 с.

Томский
политехнический
университет

Поступило в Редакцию
27 июня 1995 г.
