

УДК 621.577

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА КОНДЕНСАЦИИ ПАРА В ИСПАРИТЕЛЕ ТЕПЛООВОГО НАСОСА

Ш.У.Тауасаров, М.А.Алтыбаев, Ж.Алтыбаев
ЮКГУ им. М.Ауезова, г.Шымкент

Охлаждение и осушение воздуха в испарителе теплового насоса сопровождается конденсацией пара из воздуха на наружной поверхности стенки труб. При конденсации пара из смеси с неконденсируемыми компонентами существенную роль играет диффузионный перенос конденсируемого компонента к поверхности раздела жидкой и паровой фаз из ядра парогазовой смеси [1]. Упомянутые процессы могут быть математически описаны уравнениями тепло- и массопереноса.

Температуру поверхности пленки конденсата определим с использованием соотношений тепло-, массопереноса и уравнения теплового баланса.

Для парогазовой смеси запишем уравнение массоотдачи [2]:

$$dg_n = \pi \beta_* d_T \rho (q - q^*) \cdot dx$$

или

$$\frac{dg_n}{dx} = \pi \beta_* d_T \rho (q - q^*), \quad (1)$$

где g_n – расход конденсируемого компонента, кг/с;

ρ – плотность воздуха, кг/м³;

d_T – диаметр трубы, м;

q, q^* – текущее и равновесное влагосодержание воздуха, кг/кг;

β_* – коэффициент массоотдачи, м/с.

Уравнение теплового потока имеет вид:

$$\pi \alpha d_T (T_g - T_{н.ст.}) + \eta \frac{dg_n}{dx} = Q_0, \quad (2)$$

где T_g – температура воздуха, К;

$T_{н.ст.}$ – температура наружной поверхности стенки трубы испарителя, К;

η – удельная теплота парообразования, кДж/кг;

Q_0 – холодопроизводительность, кВт/м;

α – коэффициент теплоотдачи, кВт/(м² · К).

Запишем уравнение теплового потока через стенку трубы испарителя теплового насоса:

$$Q_0 = \pi d_T \left(\frac{\lambda_{ст.}}{\delta_{ст.}} \right) (T_{н.ст.} - T_{вн.ст.}), \quad (3)$$

где $\lambda_{ст.}$ – коэффициент теплопроводности стенки, кВт/(м · К);

$\delta_{ст.}$ – толщина стенки теплообменной трубы, м;

$T_{вн.ст.}$ – температура внутренней поверхности трубы, К.

Тепловой баланс для потока парогазовой смеси

$$Q_0 dx = G_g \cdot C_g dT_g + \eta g_n \quad (4)$$

$$\frac{dT_g}{dx} = \frac{1}{G_g \cdot C_g} \left(Q_0 - \eta \frac{dg_n}{dx} \right), \quad (5)$$

Из (2) и (3) можно получить:

$$T_{н.см.} = \frac{\pi d_T (\alpha T_0 + \frac{\lambda_{см.}}{\delta_{см.}} T_{вн.см.}) + \frac{\eta g_n}{dx}}{\pi d_T [\alpha + (\lambda_{см.} / \delta_{см.})]}, \quad (6)$$

где G_0 – массовый расход воздуха, кг/с;
 C_0 – теплоемкость воздуха, кДж/(кг · К)

Диффузионный поток конденсируемого компонента из ядра парогазовой смеси при условии $P_0 = const$ и $P_n = const$ можно рассчитать по формуле Стефана [2]:

$$\rho_{ж*} \frac{dj}{dx} = \frac{P_0}{R_* T_0} \frac{\partial}{\partial y} (P_0 - P) \Big|_{y=h} = \beta_* \frac{P_0}{R_* T_0} \ln \left(\frac{P_0 - P_s}{P_0 - P_n} \right), \quad (7)$$

Взаимосвязь равновесного давления конденсируемого компонента у поверхности пленки и ее температуры определяется уравнением Клаузиуса-Клапейрона:

$$P_s = P_w \exp \left[\frac{rM}{R_*} \left(\frac{1}{T_w} - \frac{1}{T_s} \right) \right], \quad (8)$$

$$\frac{dj}{dx} = \frac{\beta_*}{\rho_{ж*}} - \frac{P_0}{R_* \cdot T_0} \ln \left[\frac{1 - \frac{P_w}{P_0} \exp \left[\frac{rM(T_s - T_w)}{R_* T_w \cdot T_s} \right]}{1 - \frac{P_n}{P_0}} \right]. \quad (9)$$

В качестве характерного размера выберем длину исследуемого участка стенки ℓ и произведем обезразмеривание:

$$X = \frac{x}{\ell}; \quad Y = \frac{y}{\ell}; \quad \theta = \frac{T - T_w}{T_0 - T_w}; \quad H = \frac{h}{\ell};$$

$$\bar{J} = \frac{j}{v_w};$$

$$Pr = \frac{v_w^2}{g \ell^3}; \quad st = \frac{\beta_* \ell}{v_w}; \quad sf = \frac{r}{C_p (T_0 - T_w)};$$

$$Bi = \frac{\alpha \ell}{\lambda}; \quad \alpha = \frac{\lambda}{C_p \rho_{ж*} \cdot j}, \quad (10)$$

где $\rho_{ж*}$ – плотность конденсата, кг/м³;
 j – удельный расход конденсата, м³/(м · с);
 ν – коэффициент кинематической вязкости, м²/с;
 P – давление, Па;
 C_p – теплоемкость конденсата, кДж/(кг · К);
 R_* – газовая постоянная, Н · м/(кг · К);
 h – толщина пленки, м;
 r – теплота фазового перехода, кДж/кг;
 M – молекулярная масса пара, кг;

Индексы:

- w – стенка;
- s – поверхность пленки;
- o – ядро потока парогазовой смеси;
- n – пограничный слой.

После преобразований получим:

$$\frac{\bar{J}}{dx} = C_1 st \ell n \left[\frac{1 - \frac{P_1}{P_0} \exp \left(C_2 st \left(-\frac{I}{\theta_s + \theta_1} + \frac{1}{\theta_1} \right) \ell \right)}{\frac{P_n}{P_0}} \right], \quad (11)$$

где $C_1 = \frac{MP_0}{\rho_{жс} R_* T_0}$; $C_2 = \frac{MC_p}{R_*}$; $\theta_1 = \frac{T_w}{T_0 - T_w}$.

Краевые условия: $x = 0 \rightarrow H = 0$, $\theta_s = 0$, $\bar{J} = 0$.

Соотношение (11) показывает, что процесс конденсации возможен при выполнении неравенства:

$$C_2 sf \frac{\theta_s}{\theta_1 (\theta_s + \theta_1)} < \ell n \frac{P_n}{P_w} \quad (12)$$

Тогда неравенство, ограничивающее величину безразмерной температуры поверхности пленки, имеет вид:

$$\theta_s < \frac{\theta_1^2 \ell n(P_n / P_w)}{C_2 sf - \theta_1 \ell n(P_n / P_w)}; \quad \theta_{s(кр)} = \frac{\theta_1^2 \ell n(P_n / P_w)}{C_2 sf - \theta_1 \ell n(P_n / P_w)} \quad (13)$$

На рисунке 1 приведены типичные зависимости критического безразмерного перепада температуры в пленке от парциального давления пара конденсируемого компонента в смеси с воздухом при заданных значениях температуры стенки T_w и парогазовой смеси в ядре T_0 . Очевидно, что максимальное значение температуры стенки ограничено температурой точки росы смеси при данном P_n .

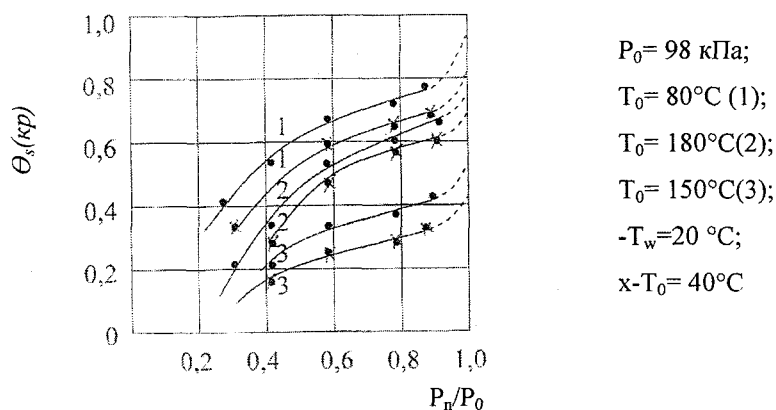
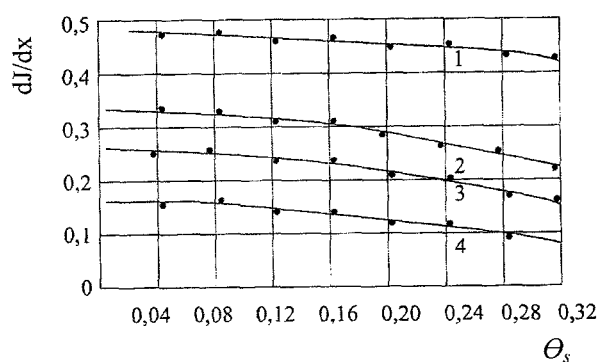


Рисунок 1 - Зависимость критического безразмерного перепада температуры в пленке от парциального давления пара

Полученные данные свидетельствуют о резком влиянии добавки неконденсируемого газа на температуру поверхности пленки. Даже небольшая добавка инертного компонента заметно снижает перепад температуры $\Delta T = T_s - T_w$ в пленке. Отсюда следует, что при конденсации пара из смеси с неконденсируемым компонентом роль температурной зависимости вязкости снижается.

На рисунке 2 показана зависимость прироста безразмерного расхода конденсата $d\bar{J}/dX$ от безразмерного перепада температуры в пленке. Анализ показывает, что значения производной $d\bar{J}/dX$ в интервале θ_s от 0 до 0,1 изменяются медленно, и тем медленнее, чем больше отношение P_n/P_0 . Прирост безразмерного расхода конденсата на начальном этапе описывается линейной функцией.



$P_n/P_0 = 0,8$ (1); $0,7$ (2); $0,6$ (3) и $0,4$ (4).

Рисунок 2 - Зависимость скорости конденсации от безразмерного перепада температуры в пленке

На рисунке 3 приведены характерные зависимости безразмерного расхода конденсата $\bar{J}$ от значения безразмерной продольной координаты.

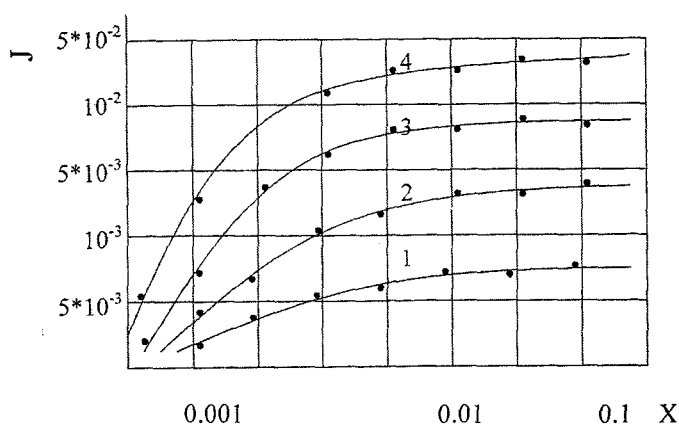


Рисунок 3 - Изменение безразмерного расхода конденсата в зависимости от безразмерной продольной координаты X

Литература

- 1 Михалевич А.А. Математическое моделирование массо-и теплопереноса при конденсации // Наука и техника. - 1982.- С.214-217.
- 2 Берман А.Д. Сопротивление на границе раздела фаз при пленочной конденсации процесса фазового превращения и методы расчета технологических аппаратов // Труды ВНИИ Химмаша.-1981.-Вып. 38.- С.88-95.

Қорытынды

Конденсат қабықшасы бетінің температурасын анықтау үшін жылу, - масса алмасу қатынастары және жылу балансының тендеуі пайдаланылған. Инерт компоненттің тіпті азғана үстемесінің қабықшадағы температура айырмасына едәуір әсері айқындалған. Конденсация жылдамдығының қабықшадағы өлшемсіз температура айырмасына тәуелділігі шығарылған.

Summary

Correlations of heat – mass transferring and equations of heat balance for determining temperature of surface of condensate film are used. Considerable influence of even little addition inert component on period of temperature in film is found out. Dependence of velocity of condensation from non dimensional decreasing of temperature in film is taken.