

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОВМЕСТНОГО ТЕПЛОМАССОБМЕНА И ПЫЛЕУЛАВЛИВАНИЯ В БАРБОТАЖНЫХ АППАРАТАХ

М.И. Шильев, А.В. Толстых, А.Н. Деренок, Е.М. Хромова

Как показывают экспериментальные исследования характеристик газожидкостного слоя в пенных аппаратах (ПА) (рис. 1) и в центробежно-барботажных аппаратах (ЦБА) [1-2], изменение расхода газа или других параметров, определяющих режим барботирования, существенным образом влияет на измеряемую температуру газожидкостного слоя, осредненную по рабочему объему барботажного аппарата. Данное обстоятельство должно быть отражено в любых моделях нестационарного тепломассообмена, предназначенных для поиска эффективных режимов эксплуатации этого типа устройств.

В настоящей работе сделана попытка применить физико-математическую модель тепломассообмена [3], локализованного в пузырях, формирующихся на отверстиях газораспределительной решетки, для решения задачи о нестационарном изменении температуры в газожидкостном слое ПА.

Процесс тепломассообмена в сферическом пузыре определится системой, включающей в себя уравнение баланса тепла и уравнение баланса паровой фазы:

$$(c_{св} + c_{нап} d_e) \frac{dT_e}{dt} + c_{нап} (T_e - 273) \frac{dd_e}{dt} - \quad (1)$$

$$- G \frac{\alpha}{\rho_{св}} (T_{нов} - T_e) = 0,$$

$$\frac{dd_e}{dt} = \frac{W}{\frac{4}{3} \pi r_n^3 \rho_{св}} = \frac{3\beta(K_{нов} - K_e)}{r_n \rho_{св}}, \quad (2)$$

которые должны быть решены при следующих начальных условиях:

$$t = 0, T_e = T_0, d_e = d_{e0}. \quad (3)$$

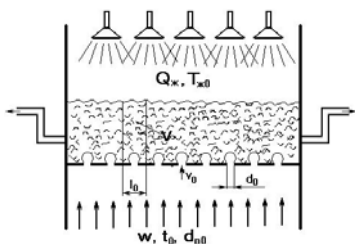


Рис. 1. Схема пенного аппарата

В соотношениях (1)-(3): $c_{св}$ – теплоемкость сухого воздуха, $c_{нап}$ – теплоемкость водяного пара, d_e – влагосодержание воздуха в пузыре, осредненное по его объему, T_e – температура воздуха в пузыре, осредненная по его объему, t – время, $G = \frac{3}{r_n}$ – параметр,

представляющий собой отношение площади поверхности сферического пузыря к его объему, α – нестационарный коэффициент теплоотдачи на поверхности пузыря, $\rho_{св}$ – плотность сухого воздуха, $T_{нов}$ – температура поверхности пузыря, W – масса испарившейся или сконденсировавшейся влаги, r_n – радиус пузыря, формирующегося на отверстии газораспределительной решетки пенного аппарата, β – нестационарный коэффициент массоотдачи на поверхности пузыря, $(K_{нов} - K_e)$ – разность концентраций водяных паров около поверхности пузыря и в среднем по объему.

Температура жидкости $T_{ж}$, по которой определяется температура на поверхности пузыря $T_{пов}$ в (1), является переменной, зависящей от времени величиной. Для ее определения необходимо записать уравнение теплового баланса слоя жидкости на решетке барботажного аппарата. Здесь и далее будем предполагать, что охлаждающая жидкость разбрызгивается равномерно по всей поверхности решетки с помощью распылителя (рис. 1). Будем исходить из того, что изменение теплосодержания жидкости

$$\int_V c_{ж} \rho_{ж} (1 - \varphi) \frac{\partial T_{ж}}{\partial t} dv, \text{ заключенной в кон-}$$

трольном объеме цилиндрической формы над отверстием решетки $V = \pi d_0^2 h_0 / 4 (1 - \varphi)$ ($l_0 = d_0 / S_0$, h_0 – высота светлого столба жидкости над решеткой, $V_{ж} = \pi d_0^2 h_0 / 4$ – объем жидкости в контрольном объеме, φ – газосодержание в пенном слое), за единицу времени определяется суммарным количеством тепла, которое передается жидкости при формировании пузыря на отверстии газораспределительной решетки и поглощается притоком охлаждающей жидкости в контрольном объеме за это время:

$$\int_V c_{жс} \rho_{жс} (1-\varphi) \frac{\partial T_{жс}}{\partial t} dv = - \int_{S_V} c_{жс} \rho_{жс} (T_{жс} - T_{жс0}) v_{нжс}^n ds + \int_V \left(\alpha_n (T_{гс} - T_{нов}) + \varphi \rho_{св} c_{нар} T_{гс} \frac{dd_g}{dt} \right) dv, \quad (4)$$

где $T_{жс0}$ – температура охлаждающей жидкости, которая поступает в камеру ПА, $v_{нжс}^n$ – нормальная составляющая скорости охлаждающей жидкости, которая поступает в контрольный объем, S_V – площадь поверхности, ограничивающей контрольный объем, $s_n = 4\pi r_n^2 / V$ – удельная теплопроводящая поверхность пузыря, ds – ориентированный по нормали элемент площади поверхности S_V .

Если среднестатистически считать $\varphi = \text{const}$ для определенного режима в выбранном объеме V , тогда после стандартных математических преобразований из (4) получим

$$c_{жс} \rho_{жс} \frac{\partial T_{жс}}{\partial t} = -c_{жс} \rho_{жс} \frac{S_0}{h_0} (T_{жс} - T_{жс0}) q v_0 + 4\alpha r_n^2 \frac{S_0}{h_0} (T_{гс} - T_{нов}) + \frac{\varphi}{1-\varphi} \rho_{св} c_{нар} T_{гс} \frac{dd_g}{dt}, \quad (5)$$

где $q = Q_{жс} / Q_{гс}$ – плотность орошения ($Q_{жс}$, $Q_{гс}$ – объемные расходы жидкости и газа соответственно), $r_n = r_n / (d_0 / 2)$ – безразмерный радиус пузыря.

Запишем начальное условие для уравнения (5). При $t = 0$ $T_{жс} = T_{жс0}$. (6)

После обезразмеривания систему уравнений (1), (2), (5) и граничные условия (3), (6) приведем к следующему виду:

$$(1 + m \frac{d\theta_g}{d\tau}) \frac{d\theta_g}{d\tau} + \frac{dd_g}{d\tau} (u_g + u_0) - St^* (u_{нов} - u_g) = 0, \quad (7)$$

$$\frac{dd_g}{d\tau} = Gr^*, \quad (8)$$

$$\frac{\partial \theta_{жс}}{\partial \tau} = -q C \theta_{жс} +$$

$$+ S_T \left(S_G St_{жс}^* r_n^2 (\theta_g - \theta_{нов}) + H \frac{dd_g}{d\tau} (\theta_g + \theta_0) \right);$$

при $\tau = 0$ $\theta_g = 0$, $d_g = d_{гс0}$, $\theta_{жс} = 0$. (10)

В соотношениях (7)-(10): $St^* = \frac{G\alpha}{c_{св} \rho_{св} f}$, $Gr^* = \frac{G\beta(K_{нов} - K_g)}{\rho_{св} f}$ – модифици-

рованные критерии Стантона и Грасгофа, $S_T = \frac{T_0}{T_{жс0}}$; $H = \frac{\varphi}{1-\varphi} \frac{\rho_{св} c_n}{\rho_{жс} c_{жс}}$; $C = \frac{v_0 S_0}{f h_0}$; $S_G = \frac{4S_0}{h_0 G}$;

$St_{жс}^* = \frac{G\alpha}{c_{жс} \rho_{жс} f}$ – модифицированный критерий

Стантона, отнесенный к теплоемкости и плотности жидкости.

Уравнения (1), (2)-(5) и их безразмерный аналог (7)-(9) записаны для времени, порядка $1/f \sim 1/20$ с, которое заканчивается в момент отрыва пузыря от отверстия газораспределительной решетки. Для перехода к модели, описывающей газожидкостный слой в целом, следует обобщить уравнения модели (7)-(9) на достаточно протяженный временной промежуток, когда теплоприток в слой за счет теплопередачи в формирующихся пузырях и, соответственно, изменение температуры жидкости может быть весьма существенным. Полученные таким способом результаты позволят дать полезные приближенные оценки взаимного влияния параметров воздуха и охлаждающей жидкости в газожидкостном слое ПА.

Уравнение теплового баланса для жидкости в ПА запишем аналогично (5), используя вместо второго и третьего слагаемых в правой части их среднеинтегральные значения, взятые на временном отрезке от возникновения до отрыва пузыря:

$$c_{жс} \rho_{жс} \frac{\partial T_{жс}}{\partial t} = -c_{жс} \rho_{жс} \frac{S_0}{h_0} (T_{жс} - T_{жс0}) q v_0 + 4 \frac{S_0}{h_0} f \int_0^{1/f} \alpha r_n^2 (T_{гс} - T_{нов}) dt + \frac{\varphi}{1-\varphi} \rho_{св} c_{нар} f \int_0^{1/f} T_{гс} \frac{dd_g}{dt} dt. \quad (11)$$

Уравнение (11) должно быть решено при следующем начальном условии:

$$t = 0 \quad T_{жс} = T_{жс0}. \quad (12)$$

Теперь перейдем к безразмерной форме соотношений (11), (12):

$$\frac{\partial \theta_{жс}}{\partial \tau} = -C \theta_{жс} + \frac{S_T}{q} \left(S_G \int_0^1 St_{жс}^* r_n^2 (\theta_g - \theta_{нов}) d\tau + H \int_0^1 \frac{dd_g}{d\tau} (\theta_g + \theta_0) d\tau \right), \quad (13)$$

при $\tau_c = 0$, $\theta_{жс} = 0$, (14)

где $\tau_c = t f q$ – безразмерное время в задаче о теплообмене жидкости в пенном слое.

Очевидно, что для того, чтобы найти решение задачи (13), (14), необходимо привлечь уравнения двухтемпературной модели (7)-(10), с использованием которых был построен итерационный процесс для численного моделирования тепломассообменных процессов в ПА. На первом шаге система уравнений (7)-(10) решалась при $t_{жс0} = 20^\circ\text{C}$ и из уравнения (13)

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОВМЕСТНОГО ТЕПЛОМАССООБМЕНА И ПЫЛЕУЛАВЛИВАНИЯ В БАРБОТАЖНЫХ АППАРАТАХ

определялась температура жидкости $t_{ж1}$ в пенном слое после отрыва первого пузыря в момент времени $t=1/f$. При выполнении каждой следующей k -ой итерации в качестве начальной температуры жидкости использовалось значение температуры $t_{жk-1}$ в момент отрыва пузыря, найденное в предыдущей итерации. Итерационный процесс заканчивался после стабилизации температуры $t_{ж}$, соответствующей стационарному режиму теплообмена жидкости и газа в ПА.

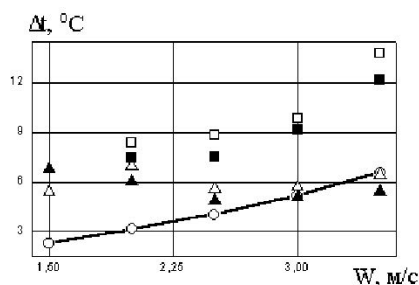
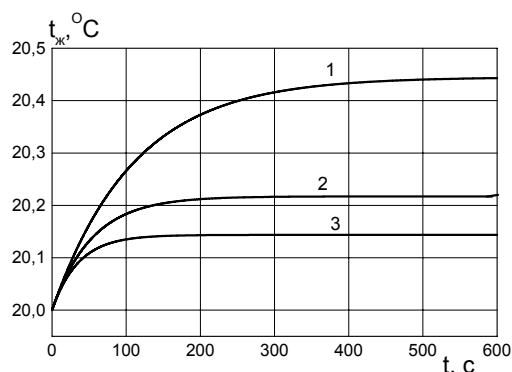
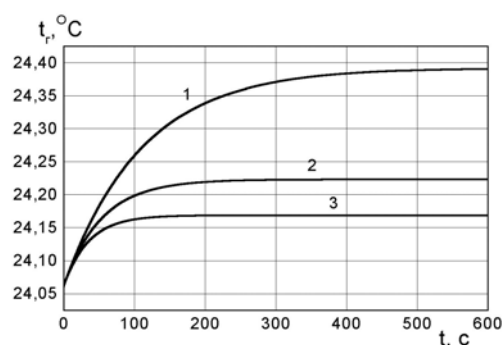


Рис. 2. Зависимость разности температур воздуха перед газораспределительной решеткой и после отрыва пузыря $\Delta t = t_v - t_{vk}$ от среднерасходной скорости w : \circ — экспериментальные данные для пенных аппаратов; расчет по модели (7)-(10): \blacktriangle - $t_0=70^\circ\text{C}$, $t_g=20^\circ\text{C}$; \blacksquare - $t_0=70^\circ\text{C}$, $t_g=10^\circ\text{C}$; \triangle - $t_0=90^\circ\text{C}$, $t_g=20^\circ\text{C}$; \square - $t_0=90^\circ\text{C}$, $t_g=10^\circ\text{C}$

К наиболее важным результатам расчетов следует отнести подтверждение предположения, высказанного в [4], об определяющем влиянии на теплообмен в барботажных аппаратах стадии формирования пузырей. Сравним экспериментальные данные [5] по изменению температуры воздуха, обрабатываемого в ПА, и полученные в настоящей работе зависимости перепада температуры воздуха в пузыре от начала формирования до момента отрыва, при варьировании начальных температур подаваемого воздуха и охлаждающей жидкости. Изменение температуры воздуха в пределах толщины газожидкостного слоя, рассчитанное по (7)-(10), (13), (14) (рис. 2), и данные экспериментов в ПА различаются лишь на 3-6 $^\circ\text{C}$, что говорит о преобладающей роли стадии формирования пузырей в охлаждении воздуха и правомерности выбранного способа моделирования теплообменных процессов.



а)



б)

Рис. 3. а) Влияние расхода охлаждающей жидкости ($W=1,5$ м/с) на ее температуру в пенном слое $t_{ж}$: 1 - $Q_{ж}=1,2 \cdot 10^{-4}$ м 3 /с; 2 - $Q_{ж}=2,4 \cdot 10^{-4}$ м 3 /с; 3 - $Q_{ж}=3,6 \cdot 10^{-4}$ м 3 /с; б) Влияние расхода охлаждающей жидкости ($W=1,5$ м/с) на температуру газа t_g на выходе из пенного слоя: 1 - $Q_{ж}=0,00012$ м 3 /с; 2 - $Q_{ж}=0,00024$ м 3 /с; 3 - $Q_{ж}=0,00036$ м 3 /с

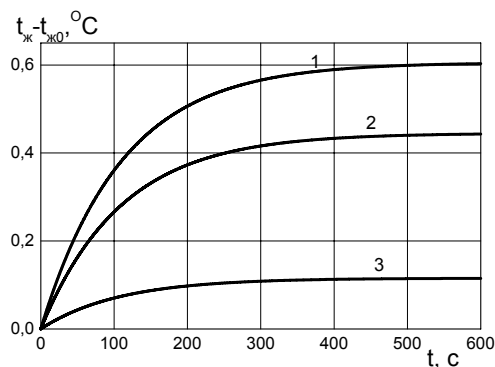


Рис. 4. Зависимости абсолютного изменения температуры жидкости в пенном слое $t_{ж} - t_{ж0}$ от времени при различных значениях начальной температуры жидкости $t_{ж0}$ ($W=1,5$ м/с, $Q_{ж}=0,00012$ м 3 /с): 1 - $t_{ж0}=30^\circ\text{C}$; 2 - $t_{ж0}=20^\circ\text{C}$; 3 - $t_{ж0}=10^\circ\text{C}$

На рис. 3 (а) показано, как влияет изменение расхода охлаждающей жидкости на зависимость температуры жидкости в ПА от безразмерного времени. Видно, что увеличение расхода от $1,2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ до $3,6 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ приводит к резкому уменьшению темпа роста температуры (см. линии 1 и 3). При $Q_{ж}=3,6 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ за 10 мин. температура жидкости в камере ПА увеличивается на $0,14^\circ\text{C}$, а при $Q_{ж}=1,2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ за тот же промежуток времени $t_{ж}$ достигает $20,45^\circ\text{C}$, т.е абсолютное изменение температуры составит $0,45^\circ\text{C}$. Таким образом, при изменении расхода в 3 раза от $3,6 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ до $1,2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ темп роста температуры увеличивается прямо пропорционально уменьшению расхода. Время выхода на стационарный режим также зависит от величины расхода и при $Q_{ж}=1,2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ область нестационарного изменения температуры жидкости существенно превосходит аналогичные временные промежутки при больших расходах.

На рис. 3 (б) приведены графики, показывающие изменение температуры газа на выходе из барботажного аппарата при тех же расходах охлаждающей жидкости, что и на рис. 3 (а).

На рис. 4 приведены зависимости $t_{ж}-t_{ж0}$ от времени t при различных значениях температуры охлаждающей жидкости $t_{ж0}$ в ПА. Видно, что увеличение температуры $t_{ж0}$ приводит к более быстрому росту температуры жидкости в пенном слое ПА. Так, например, при $t_{ж0}=30^\circ\text{C}$ и $t_{ж0}=10^\circ\text{C}$ абсолютное изменение температуры ($t_{ж}-t_{ж0}$) за время 10 мин. составляет $0,6^\circ\text{C}$ и $0,11^\circ\text{C}$ соответственно.

Известно, что можно добиться существенного повышения эффективности улавливания частиц пыли за счет конденсации на них водяных паров. Конденсацию паров на мелких частицах наиболее целесообразно осуществлять в малых объемах при высокой интенсивности протекания тепломассообменных и гидродинамических процессов. Такие условия реализуются в пузырьках, формирующихся на отверстиях газораспределительных решеток в пенных аппаратах.

Результаты, полученные при проведении расчетов по уравнениям двухтемпературной модели, предполагается использовать для расчета характеристик капель, образующихся на частицах. Для этого в настоящей работе выполнена постановочная часть задачи по моделированию развития капель на частицах при малых концентрациях пыли в очищаемом воздухе.

Если концентрации частиц в очищаемом воздухе малы, то переносом тепла и массы в процессе абсорбции частиц на поверхности пузыря можно пренебречь. Задача сводится к решению уже полученного в [6] дифференциального уравнения для концентрации частиц, в котором параметры частиц заменяются на эффективные параметры капли с частицей внутри размером $d_{\delta k}$ и плотностью $\rho_{\delta k}$ (рис. 5).

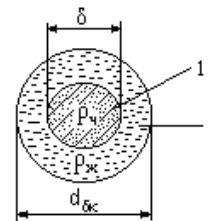


Рис. 5. Схема частицы с конденсатом на поверхности: 1 – частица, 2 – конденсат

Это уравнение имеет вид

$$\frac{1}{n_{\delta k}} \frac{dn_{\delta k}}{dr_w} = - \frac{48}{d_0^2 V_0} \left[\frac{24}{A} \frac{\phi_{\delta k} (\kappa V_0)^2}{(d_{\delta k}/H_2)^{l-n}} \right]^{\frac{1}{2-n}} \frac{1}{r_w^{2-n}}, \quad (15)$$

где $n_{\delta k}$ - концентрация частиц внутри пузыря в условиях конденсации водяных паров на них; κ - эмпирический коэффициент, для ПА $\kappa \approx 0,03-0,035$ [6]; v_r - кинематический коэффициент вязкости газа; A и n - постоянные в законе для коэффициента сопротивления частиц с конденсатом водяных паров на поверхности, которые далее будем называть просто каплями, $Re_{\delta k} = \frac{A}{Re_{\delta k}^n}$, $Re_{\delta k} = \frac{|\vec{w}_{\delta k}| d_{\delta k}}{H_2}$,

$|\vec{w}_{\delta k}|$ - модуль относительной (обтекания газом) скорости капли; $\tau_{\delta k}$ - время динамической релаксации капли; $\mu_r = \rho_r \nu_r$ - коэффициент динамической вязкости газа, ρ_g - плотность газа, $\rho_{\delta k}$ - эффективная (среднеобъемная) плотность капли:

$$c_{\delta k} = c_{ж} + \frac{c_{ч} - c_{ж}}{D^3}, \quad \rho_{\delta k}, \rho_{ч} - \text{плотность жидкости (конденсата) и частицы соответственно,}$$

$\Delta = d_{\delta k}/D$ - относительный размер капли; $\bar{\Gamma}_w = r_w/r_{wk}$ - относительный размер пузыря, $r_{wk} = r_w(\tau = \tau_k)$, $\tau_k = 1/f$, f - частота отрыва пузыря от отверстия решетки.

Очевидно, что для решения уравнения (15) необходимо найти размер капли с частицей $d_{\delta k}$, необходимо использовать уравнение Максвелла для скорости конденсации, которое в рассматриваемом случае можно записать в безразмерной форме

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОВМЕСТНОГО ТЕПЛОМАСООБМЕНА И ПЫЛЕУЛАВЛИВАНИЯ В БАРБОТАЖНЫХ АППАРАТАХ

$$\frac{d(\Delta^2)}{d\tau} = (\bar{P}_e - \bar{P}_{\delta k}), \quad (16)$$

с начальным условием:

$$\text{при } \bar{\tau} = 0 \quad \Delta = 1, \quad (17)$$

где $\bar{P}_e - \bar{P}_{\delta k}$ – безразмеренная разность среднеобъемного давления воздуха в пузырье и у поверхности капли, $\bar{P}_e = P_e \frac{4 M_n D_n}{9 R_g \rho \mu_e T_e}$,

$$\bar{P}_{\delta k} = P_{\delta k} \frac{4 M_n D_n}{9 R_g \rho \mu_e T_e}, \quad \Delta = d_{\delta k} / \delta - \text{ относительный}$$

размер капли с частицей, $\bar{\tau} = t / \tau_{\delta}$ – безразмерное время ($\tau_{\delta} = \frac{\rho_s \delta^2}{18 \mu_e}$ – время релаксации

частицы, ρ_s – плотность частицы, μ_e – динамическая вязкость газа), M_n – молекулярная масса пара, R_g – универсальная газовая постоянная, $\bar{\rho} = \rho_{ж} / \rho_s$, D_n – коэффициент диффузии пара.

Коэффициенты D_n и μ_e могут быть рассчитаны по известным эмпирическим соотношениям, исходя из значения T_e (температура влажного воздуха в пузырье), которое можно определить при расчете по модели (7)-(10), (13), (14). Давление влажного воздуха P_e также можно найти из решения задачи о тепломассообмене в пузырье, формирующемся на отверстии газораспределительной решетки. Величина $P_{\delta k}$ зависит от температуры у поверхности капли ($T_{\delta k}$) и является парциальным давлением насыщенных паров, соответствующим этой температуре. Таким образом, следующим этапом является определение температуры поверхности капли, на которой конденсируется водяной пар.

Для этого запишем, используя эффективные параметры, уравнение теплообмена системы капля-частица с окружающей ее внутренней парогазовой средой пузыря:

$$\frac{d(c_{\delta k} \rho_{\delta k} V_{\delta k} T_{\delta k})}{dt} = \frac{dq_n}{dt} r - \alpha_{\delta k} (T_{\delta k} - T_e) F_{\delta k}. \quad (18)$$

В уравнении (18)

$$c_{\delta k} = \frac{\rho_s}{\rho_{\delta k}} \left(\frac{c_s}{\Delta^3} + \left(1 - \frac{1}{\Delta^3} \right) \rho_{ж} \right) - \text{ эффективная теплоемкость капли с частицей } (c_s, c_{ж} - \text{ теплоемкости частицы и жидкости), } T_{\delta k} = \frac{T_s + \bar{\rho}(\Delta^3 - 1)T_{ж}}{1 + \bar{\rho}(\Delta^3 - 1)}$$

эффективная температура системы капля-частица (T_s , $T_{ж}$ – температуры частицы и сконденсировавшейся жидкости соответственно), $V_{\delta k} = \pi d_{\delta k}^3 / 6$ – объем капли с частицей, $\frac{dq_n}{dt} r$ – количество теплоты, выделяющееся или по-

глощающееся при конденсации или испарении водяного пара на поверхности капли (r – удельная теплота фазового перехода для воды), $\alpha_{\delta k}$ – коэффициент теплоотдачи на поверхности капли, $F_{\delta k} = \pi d_{\delta k}^2$ – площадь поверхности капли.

Для решения уравнения (18) необходимо задать начальное значение температуры $T_{\delta k}$, как величину T_0 (начальная температура частицы, совпадающая с температурой газа, поступающего в пузырь):

$$t = 0 \quad T_{\delta k} = T_0. \quad (19)$$

После достаточно громоздких математических преобразований, которые здесь опущены, уравнение (18) можно привести к следующему виду

$$\frac{d}{d\tau} \left(\frac{(\bar{c}_s + \bar{\rho}(\Delta^3 - 1)\bar{c}_{ж})\bar{T}_s + \bar{\rho}(\Delta^3 - 1)\bar{T}_{ж}}{1 + \bar{\rho}(\Delta^3 - 1)} \right) = \left(20 \right) \\ = K_r \frac{d(\Delta^3)}{d\tau} - \frac{1}{3} \frac{Nu_{\delta k}}{Pr_0} \Delta (T_{\delta k} - T_e).$$

Здесь $\bar{c}_s = c_s / c_{s0}$, $\bar{c}_{ж} = c_{ж} / c_{s0}$ – теплоемкости частицы и жидкости, безразмеренные по начальной теплоемкости газа, $\bar{T}_s = T_s / T_0$, $\bar{T}_{ж} = T_{ж} / T_0$, $K_r = \bar{\rho} \frac{r}{c_{s0} T_0}$, $Pr_0 = \frac{\mu_{e0} c_{s0}}{\lambda_{e0}}$ – параметр входа газового потока, $Nu_{\delta k} = 2 + 0,495 Re_{\delta k}^{0,55} Pr_0^{0,33} \left(Re_{\delta k} = \frac{|\bar{w}_{\delta k}| d_{\delta k} \rho_s}{\mu_e} \right)$.

Для малых $Bi = \frac{\alpha_s (d_{\delta k} - \delta)}{2\lambda_s}$, что должно

выполняться, можно принять температуру поверхности капли равной средней температуре конденсата, т.е. $T_{\delta k} \approx T_{ж}$, тогда имеем

$$\frac{d}{d\tau} \left(\frac{(\bar{c}_s + \bar{\rho}(\Delta^3 - 1)\bar{c}_{ж})\bar{T}_s + \bar{\rho}(\Delta^3 - 1)\bar{T}_{ж}}{1 + \bar{\rho}(\Delta^3 - 1)} \right) = \left(21 \right) \\ = K_r \frac{d(\Delta^3)}{d\tau} - \frac{1}{3} \frac{Nu_{\delta k}}{Pr_0} \Delta (T_{ж} - T_e), \\ \text{при } \bar{\tau} = 0 \quad \bar{T}_{\delta k} = 1. \quad (22)$$

Уравнение (21) содержит две переменные \bar{T}_s и $\bar{T}_{ж}$. Для определения температуры \bar{T}_s можно записать уравнение теплопроводности сферической оболочки конденсата:

$$c_s \rho_s V_{\delta} \frac{dT_s}{dt} = - \frac{2\pi(T_s - T_{ж})}{\lambda_{ж} \left(\frac{1}{\delta} - \frac{1}{d_{\delta k}} \right)}, \quad (23)$$

где $V_{\delta} = \frac{\pi \delta^3}{6}$ – объем частицы.

После безразмеривания (23) получим

$$\frac{d\bar{T}_s}{d\tau} = - \frac{2}{3} \frac{1}{Pr_0} K_c \frac{\Delta}{\Delta - 1} (\bar{T}_s - \bar{T}_{ж}), \quad (24)$$

где $K_c = \frac{\lambda_{ж} c_{s0}}{\lambda_s c_s}$.

Уравнение (24) должно быть решено при следующем начальном условии:

$$\bar{\tau} = 0 \quad \bar{T}_v = 1. \quad (25)$$

Таким образом, сформулирована полностью замкнутая задача (соотношения (16), (17), (21), (22), (24), (25)) о конденсации паров воды на частицах пыли, находящихся внутри пузыря, формирующегося на отверстии газораспределительной решетки барботажного аппарата. В результате ее решения можно определить характерные параметры системы капля-частица, которые необходимы для расчета процессов пылеулавливания в пенных аппаратах по уравнению (15).

ЛИТЕРАТУРА

1. Браунштейн Б.И., Щеголев В.В. Гидродинамика, массо- и теплообмен в колонных аппаратах. – Л.: Химия.- 1988.- 336 с.
2. Шияев М.И., Дорохов А.Р. Теплообмен в центробежно-барботажном аппарате // Изв. вузов. Строительство.- 1998.- №1.- С. 60-66.
3. Шияев М.И., Толстых А.В., Деренок А.Н. Исследование процесса теплообмена в пузыре, формирующемся на отверстии газораспределительной решетки // Изв. вузов. Строительство.- 1999.- №4.- С. 79-85.
4. Волошко А.А. Теплообмен при образовании пузырей // Теор. основы хим. технол.- 1994.- Т. 24, №2.- С. 185-187.
5. Богатых С.А. Охлаждение воздуха в аппаратах с пенным режимом // Холодильная техника.- 1961.- С. 31-35.
6. Шияев М.И., Дорохов А.Р. Методы расчета и принципы компоновки пылеулавливающего оборудования: Учебное пособие. – Томск: Изд-во ТГАСУ, 1999. – 209 с.