

С.А.Конеv, Ф.М.Гимранов, Н.Х.Зиннатуллин

РАСЧЁТ ПРОЦЕССА НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ АБСОРЦИИ В ЦЕНТРОБЕЖНЫХ ПЛЁНОЧНЫХ АППАРАТАХ

Высокая эффективность центробежных аппаратов обусловлена многими факторами: сильно развитой межфазной поверхностью, отсутствием застойных зон, малым перепадом давления по высоте аппарата и небольшими габаритами. Этим аппаратам свойственно незначительное время пребывания жидкой фазы на массообменном элементе (МЭ), что требует особой точности расчёта процесса переноса на МЭ и аппарата в целом. Практика эксплуатации центробежных аппаратов показала наибольшую целесообразность их использования в качестве жидкостных хемосорберов. Но поглощение ряда газов сопровождается существенными тепловыми эффектами растворения, которые изменяют величину движущей силы процесса и условие насыщения. Задачей настоящего исследования является оценка влияния теплоты фазового перехода на процессы переноса в случае физической абсорбции газов в центробежном поле, с учётом теплообмена плёнки жидкости с окружающим её газом.

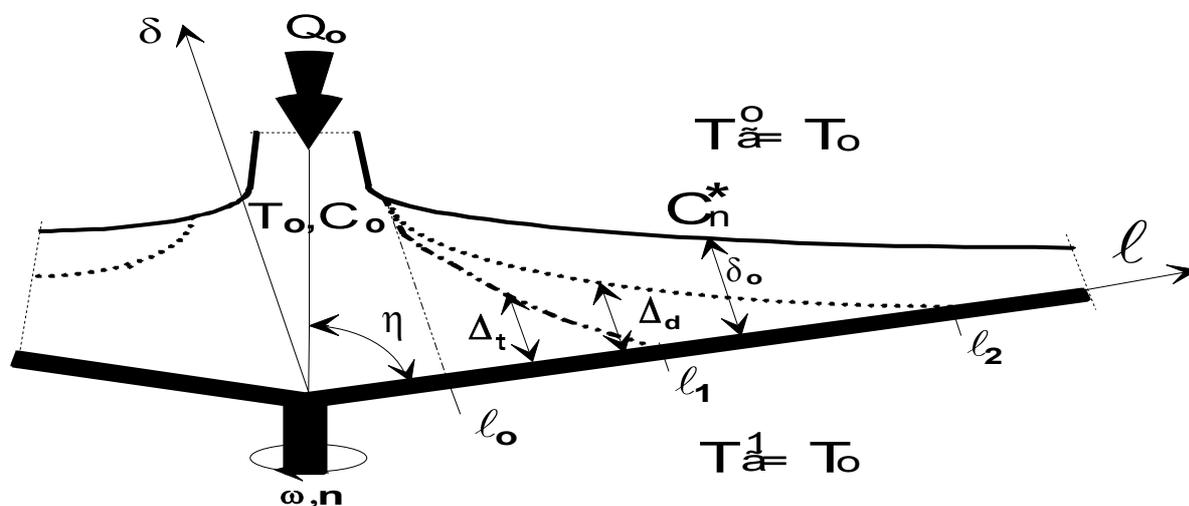


Рис.1. Графическое представление рассматриваемой задачи.

Предполагается что газ имеет бинарный состав- абсорбируемый и инертный компоненты. При $l \geq l_0$, равновесная концентрация абсорбируемого газа связана с локальной температурой поверхности зависимостью $C_n^* = dT_n + b$. Температура свободной поверхности плёнки жидкости переменная вдоль образующей МЭ, поскольку она предопределяется как теплом абсорбции, так и тепловым взаимодействием с

окружающим газом. Температура газа равна начальной температуре жидкости T_0 .

После оценки членов, процесс неизотермической абсорбции описывается следующей системой уравнений, записанной в системе координат λ , δ и φ — привязанной к МЭ для жидкой фазы (рис.1):

$$V_\ell \frac{\partial V_\ell}{\partial \ell} + V_\delta \frac{\partial V_\ell}{\partial \delta} = F_\ell + v \frac{\partial^2 V_\ell}{\partial \delta^2}; \quad (1)$$

$$\frac{\partial V_\ell}{\partial \ell} + \frac{V_\ell}{\ell} + \frac{\partial V_\delta}{\partial \delta} = 0; \quad (2)$$

$$V_\ell \frac{\partial C}{\partial \ell} + V_\delta \frac{\partial C}{\partial \delta} = D \frac{\partial^2 C}{\partial \delta^2}; \quad (3)$$

$$V_\ell \frac{\partial T}{\partial \ell} + V_\delta \frac{\partial T}{\partial \delta} = a \frac{\partial^2 T}{\partial \delta^2}. \quad (4)$$

Используя модель пограничного слоя и метод интегральных соотношений [1], задача решения системы (1)-(4) разбивается на несколько взаимосвязанных подзадач (областей):

1. Формирования теплового и диффузионного пограничного слоёв (ТПС и ДПС);
2. установления теплового равновесия и формирования ДПС;
3. установления тепло- и массообменного равновесия.

Для всех рассматриваемых областей предполагаются справедливыми следующие допущения: - полное и парциальные давления газа, а также его температура в ядре- не изменяются в процессе абсорбции; коэффициенты переноса остаются постоянными; сила Кориолиса мала; - плёнка жидкости гладкая, ламинарная; профиль скорости сформирован по всей толщине плёнки жидкости.

Граничные условия в областях:

Область 1, $\ell \in]\ell_0, \ell_1]$:

$$\delta = \delta_0: C_n^* = dT_n + b: \tau_n = 0: -\lambda_G \left(\frac{\partial T}{\partial \delta} \right) = -R_a D \left(\frac{\partial C}{\partial \delta} \right) + q; \quad (5)$$

$$\delta = \Delta_d: C = C_0: \frac{\partial C}{\partial \delta} = 0; \quad (6)$$

$$\delta = \Delta_t: T = T_0: \frac{\partial T}{\partial \delta} = 0; \quad (7)$$

$$\delta = 0: \tau = \tau_P: V_\ell = V_\delta = 0. \quad (8)$$

Область 2, $l \in [l_1, l_2]$:

Граничные условия (5) и (6) остаются неизменными. Условия (7) и (8) трансформируются в следующие:

$$\delta = 0: \tau = \tau_p: V_\ell = V_\delta = 0: -\lambda_G \left(\frac{\partial T}{\partial \delta} \right) = q. \quad (9)$$

Область 3, $l \in [l_2, +\infty]$:

В области условие (5) остаётся без изменения. Условие (9) примет вид:

$$\delta = 0: \tau = \tau_p: V_\ell = V_\delta = 0: -\lambda_G \left(\frac{\partial T}{\partial \delta} \right) = q: C = C_p: \frac{\partial C}{\partial \delta} = 0. \quad (10)$$

Для выражения удельной величины потока тепла можно воспользоваться уравнением /2/:

$$q = \lambda_\Gamma \sqrt{\frac{\omega \sin \eta}{\nu_\Gamma}} t'(0) (T_n - T), \quad (11)$$

где $t'(0) = \left[\int_0^\infty \exp \left(\text{Pr}_\Gamma \int_0^\infty h d\xi \right) d\xi \right]^{-1}$ и $h(\xi) = h \left(\delta \sqrt{\frac{\omega \sin \eta}{\nu_\Gamma}} \right)$ - профиль нормальной составляющей скорости в задаче Кармана.

В случае граничного условия (5) $T = T_\Gamma^0$, а в случаях (9) и (10) $T = T_\Gamma^1$. Для простоты анализа профили скорости, температуры и концентрации записываются в виде квадратичных парабол, коэффициенты которых находятся из граничных условий областей. Подстановка профилей в интегральные соотношения, приведение подобных членов, интегрирование и дифференцирование - сводит задачу решения системы (1)-(4) к задаче Коши для системы обыкновенных дифференциальных уравнений относительно искомых параметров областей:

$$1. \delta_0; \Delta_t; \Delta_d; 2. \delta_0, T_p, \Delta_d; 3. \delta_0, T_p, C_p.$$

В качестве начальных условий использованы уравнения работ /3,4/.

Системы обыкновенных дифференциальных уравнений решены методом Рунге-Кутты-Мерсона при следующих параметрах, приведённых в таблице в случае системы аммиак-воздух-вода. Кроме этого, приведённые на рисунках интегральные кривые были получены при следующих условиях:

$$\eta = 52^\circ; Q_0 = 30 \dots 10^{-3} \left(\frac{kg}{c} \right); T_\Gamma^0 = 323(K); l_0 = 6.706 \dots 10^{-2} (m).$$

$$\omega = 31.42 (1/c): 1. T_0 = 283 (K); 2. T_0 = 293 (K); 3. T_0 = 303 (K);$$

$$4. T_0 = 323 (K).$$

$$T_0 = 283 (K): 5. \omega = 52.36 (1/c); 6. \omega = 31.42 (1/c).$$

T_0, K	283	293	303	323
$-d \cdot 10^3, \frac{mol}{kg \cdot K}$	1.926	1.734	1.525	1.316
$b \cdot 10^{-1}, \frac{mol}{kg}$	1.541	1.493	1.410	1.326

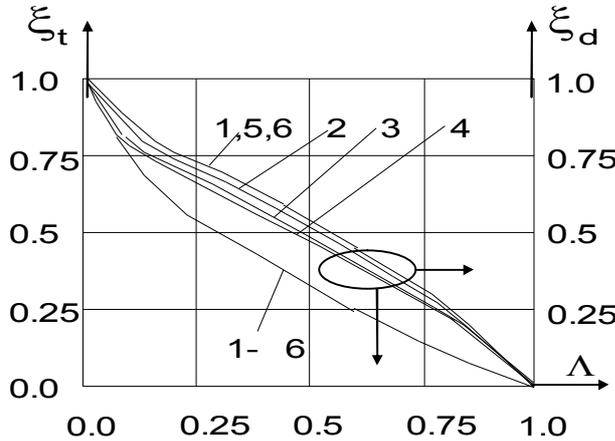


Рис.2. Интегральные кривые для систем диоксид углерода-воздух-вода и аммиак-воздух-вода в области 1.

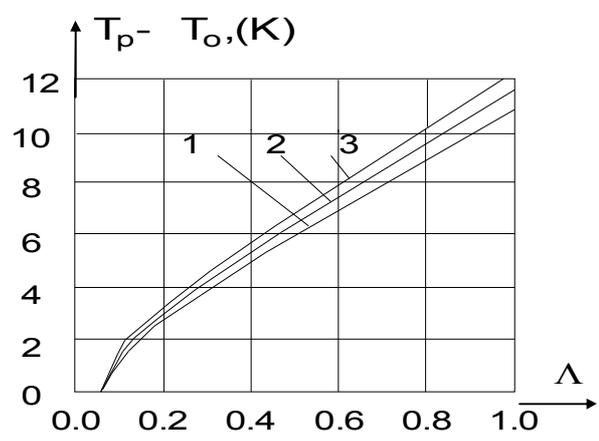


Рис.3. Зависимости локальной температуры поверхности МЭ во 2-ой области для системы аммиак-воздух-вода ($\omega = 31.42$ (1/с)).

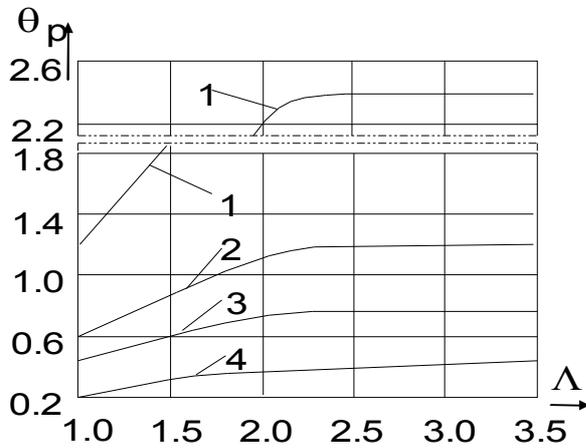


Рис.4. Интегральные кривые безразмерной температуры у поверхности МЭ во областях 2 и 3.

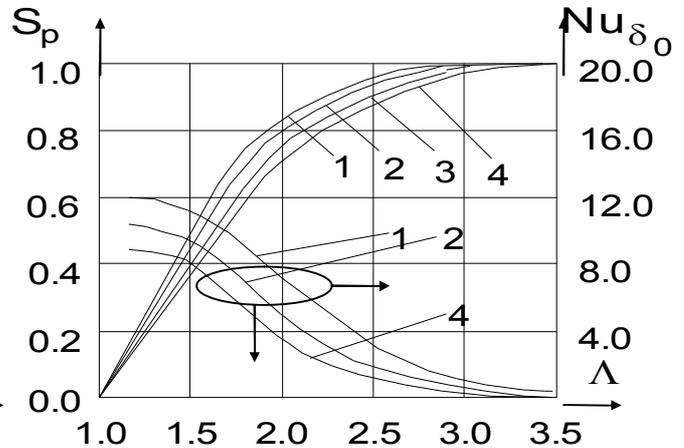


Рис.5. Графики безразмерной концентрации у поверхности МЭ и критерия Нуссельта вдоль свободной поверхности плёнки жидкости.

Представленные на рис.2 интегральные кривые показали, что ДПС не описывается одной функцией вдоль образующей МЭ (в данных координатах и в отличие от изотермической абсорбции), а зависит от теплообмена плёнки с окружающей средой и тепловыделений при абсорбции. Так, расчёт показал, что в результате водной абсорбции аммиака, температура плёнки жидкости из-за наличия тепловыделений может возрасти на десять и более градусов (см. рис.4), что приводит к увеличению коэффициента Генри приблизительно на 13%. Это увеличение изменяет величину движущей силы процесса и условия насыщения плёнки жидкости абсорбируемым газом. Учёт неизотермичности (при тех же режимах) водной абсорбции диоксида углерода показал рост температуры плёнки воды не более чем на 1 (К). Ещё меньшее значение получено для водной абсорбции кислорода. Из приведённых на рис.5 графиков следует, что протяжённость области формирования ДПС может служить масштабным параметром при проектировании центробежных абсорберов. Причём состояние насыщения абсорбируемым газом плёнки практически достигается на длине, равной 3.5 длинам формирования ДПС. Для оценки этой длины можно воспользоваться следующей приближённой формулой, полученной для случая постоянной концентрации вдоль границы раздела газа и жидкости:

$$\ell_2 = \sqrt[8]{\left\{ \frac{17}{120} \left(\frac{3Q_0^4 \mu_G}{2\pi^4 \omega^2 \rho} \right)^{1/3} \frac{1}{D \sin^2 \eta} + \ell_0^{8/3} \right\}^3}. \quad (12)$$

Погрешность, при расчёте длины развития ДПС по формуле (12) не превышает 15% при всех комбинациях ранее приведённых параметров.

Знание поведения интегральных кривых позволяет, после выражения таких показателей процесса, как средне расходные температура и концентрация, коэффициенты тепло- и массоотдачи, полученные с их помощью критерии Нуссельта и Шервуда- детально исследовать процесс. Так, уравнение для определения температуры свободной поверхности плёнки жидкости будет выглядеть:

$$\Theta_n = \frac{\frac{R_a D}{T_0} \frac{(1 - \xi_t)}{(1 - \xi_d)} (dT_0 + b - C_0) + \frac{\alpha_\Gamma^0 \delta_0}{2} (1 - \xi_t) \Theta_\Gamma^0 + \left(\lambda_G + \frac{\alpha_\Gamma^1 \delta_0}{2} \right) \Theta_p}{\lambda_G - R_a D d \frac{(1 - \xi_t)}{(1 - \xi_d)} + \frac{\alpha_\Gamma^0 \delta_0}{2} (1 - \xi_t)}. \quad (13)$$

Критерии Нуссельта и Шервуда в первой области находятся с помощью следующего уравнения

$$\left(\frac{Nu}{4}, Sh \right) = \frac{40}{11 + 7N + 3N^2 - N^3}, \quad (14)$$

в котором в случае критерия Нуссельта переменные принимают следующие значения: $\mathfrak{N} = \xi_t$ и $\mathfrak{R} = (\delta_0 - \Delta_t)$, $\mathfrak{N} = \xi_t$, $\mathfrak{R} = (\delta_0 - \Delta_d)$.

Из выражения (14) видно, что значения критериев $Nu/4$ и Sh убывают к концу первой области от $+\infty$ и в случае полного заполнения пограничными слоями плёнки жидкости- принимают значения $40/11$.

Средне расходную температуру в областях можно определить с помощью выражения

$$\Theta_Q = \theta_p + \frac{2\alpha_\Gamma^1 \delta_0}{5\lambda_G} \theta_p + \frac{9}{20} \left[\frac{R_a D}{\lambda_G T_0} C_0 (\tilde{S}_n^* - \tilde{S}_p) - \frac{\alpha_\Gamma^0 \delta_0}{2\lambda_G} (\Theta_n - \Theta_\Gamma^0) \right]. \quad (15)$$

Проведя аппроксимацию интегральных кривых, подставив в соотношения показатели процессов переноса и проинтегрировав их по поверхности тепло- массообменного контакта, можно с помощью полученных выражений осуществить расчёт процесса неизотермической абсорбции в зависимости от геометрических размеров МЭ, требований технологии и свойств взаимодействующих веществ /5/.

Обозначения: переменные:

V - скорость (м/с); ω - частота вращения МЭ (1/с); T - температура (К); C - концентрация; $F_\ell = \omega^2 \ell \sin \eta - g \cos \eta$ - продольная составляющая массовой силы $\left(\frac{m}{c^2}\right)$; ν - коэффициент кинематической вязкости $\left(\frac{m^2}{c}\right)$; D - коэффициент диффузии $\left(\frac{m^2}{c}\right)$; a - коэффициент температуропроводности $\left(\frac{m^2}{c}\right)$; η - половина угла при вершине МЭ; Q - расход жидкости (кг/с); λ - коэффициент теплопроводности (Вт/(м К)); R_a - теплота абсорбции (Дж/кг); τ - касательное напряжение (Па); δ_0 - толщина плёнки жидкости (м); $(\delta_0 - \Delta_d)$ - толщина ДПС (м); $(\delta_0 - \Delta t)$ - толщина ТПС (м).

Комплексы:

Прандтля: $Pr = \nu/a$; Нуссельта: $Nu_{\mathfrak{R}} = \frac{4\alpha\mathfrak{R}}{\lambda_G}$; Шервуда: $Sh_{\mathfrak{R}} = \frac{\beta\mathfrak{R}}{D}$.

Индексы:

нижние: o - начальное значение; p - поверхность МЭ; λ - продольная компонента; δ - поперечная компонента; Γ - параметр относится к газу; G - к жидкости; n - к свободной поверхности; Q - средне расходное значение.

верхние: o - параметр относится к газу над плёнкой жидкости; 1 - параметр относится к газу под МЭ; $*$ - равновесное значение.

Безразмерные переменные:

$$\Lambda = \frac{\ell - \ell_o}{\ell_2 - \ell_o}; \xi_t = \frac{\Delta_t}{\delta_o}; \xi_d = \frac{\Delta_d}{\delta_o}; \Theta_p = \frac{T_p - T_o}{T_o}; S_p = \frac{C_p - C_\Gamma^o}{C_\Gamma^o}; \tilde{S} = \frac{\tilde{C} - C_0}{C_0};$$

сокращения:

ТПС- тепловой пограничный слой; ДПС- диффузионный пограничный слой.

Л и т е р а т у р а

1. Конев С.А., Гимранов Ф.М., Булатов А.А., Зиннатуллин Н.Х., Диульский М.А.. Абсорбция газов тонкими плёнками жидкости, текущими в поле центробежных сил// Тепло- и массообмен в химической технологии.- Казань, 1990.- с.73-78.- (Межвуз. сб. науч. тр./КГТУ).
2. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя.-М.: -Наука, 1974.-711 с.
3. Гейзли К., Чарват А.. Поведение тонкой плёнки жидкости на вращающемся диске// Тепло- и массоперенос. -Минск, 1968.- с.401-419.- (Сб. науч.тр./ИТМО АН БССР).
4. Hinse J.O., Milborn H. Atomization of liquids by means of rotating cup//J. Appl. Mech. -1950.- v.17, №2. -р. 145-154.
5. Конев С.А.. Абсорбция в центробежных плёночных аппаратах и методы её расчёта// Автореф. дис. ... канд. техн. наук.- Казань, 1995.- 16 с.