

Аннотация:

В приближении пограничного слоя проведены численные расчёты абсорбции газа в гладкую, ламинарную плёнку жидкости текущей в центробежном поле с учётом сопротивления переносу импульса и массы со стороны газовой среды. При решении был использован метод интегральных соотношений и граничные условия четвёртого рода. Получены интегральные кривые, характеризующие развитие динамического пограничного слоя в газе, толщины плёнки жидкости, диффузионных пограничных слоёв в газе и жидкости, позволяющих рассчитать все характеристики течения фаз и массообмена системы. Показано, что в случае представления профилей скоростей и концентраций в виде квадратичных парабол, критерий Шервуда в газовой фазе принимает постоянное численное значение равное 5. Критерий Шервуда в жидкой фазе асимптотически стремится к численному значению 3.64.

Физическая абсорбция газа в центробежном поле с учётом динамического и диффузионного сопротивления газовой среды

С.А.Конеv, Ф.М.Гимранов, Н.Х.Зиннатуллин, Е.Б.Гаврилов

Складывающиеся в сфере материального производства рыночные отношения и сложная экологическая обстановка требуют создания высокоэффективных универсальных тепло- массообменных аппаратов, позволяющих синтезировать или улавливать различные продукты. Эффективность аппаратов можно повысить за счёт внешнего подвода энергии, в частности поля центробежных сил. Центробежное силовое поле позволяет снизить межфазное сопротивление, уменьшить время пребывания веществ в аппарате (что особенно важно при тепловом контакте термолабильных веществ с нагретыми элементами аппарата), улучшить управляемость процессом за счёт изменения условий вокруг или в самих взаимодействующих фазах.

Центробежные тепло- массообменные аппараты из-за своих преимуществ-развитой гидро- и газодинамики потоков, малого гидравлического сопротивления и отсутствия застойных зон, возможности использования самих тепло- массообменных элементов в качестве насосов для организации рециркуляции жидкой фазы, высоких коэффициентов тепло-и массопередачи и т.д. - находят всё большее применение в малотоннажном производстве продуктов в таких областях промышленности, как химическая, нефтеперерабатывающая, химико фармацевтическая, а также в холодильной и космической технике, при решении проблем экологии, переработке сельскохозяйственных продуктов и т.д..

Стремление к интенсификации рабочих процессов в тепло массообменных аппаратах привело к одновременному использованию в одном аппарате двух интенсифицирующих факторов: наложение центробежного массового поля на взаимодействующие фазы и плёночное течение жидкости по твёрдой поверхности. В качестве источника центробежного поля получили применение конические ротора с различными углами при вершине. Проектирование новых, оптимальная эксплуатация действующих центробежных массообменных аппаратов требует разработки методики расчёта их параметров /1,2/. Работа в этой области находится на начальном этапе и требует дальнейшего развития, особенно в области абсорбции хорошо- и среднерастворимых газов. Некоторые результаты исследований по влиянию на процесс диффузионного сопротивления газа опубликованы в работах Н.С.Мочаловой, Л.П.Холпанова, Хр. Бояджева и др. /5,6,7/.

Рассматриваемый нами процесс абсорбции представлен на рис.1. Так на внутреннюю поверхность вращающегося с постоянной угловой скоростью ω гладкий конус подаётся абсорбент. Расход абсорбента Q_0 и температура T_0 - неизменные во время всего процесса.

Процесс рассматривается в цилиндрической системе координат l, d и j . Предполагается, что начиная с длины l_0 образующей конуса, неподвижный относительно плёнки газ начинает ею вовлекаться в движение из-за наличия динамического взаимодействия фаз. Вследствие этого, в газе возникает динамический пограничный слой характеризуемый толщиной $(\delta_{ог} - \delta_0)$. Одновременно из-за рас-

- установления равновесия массообмена, $\ell \in [\ell_1, +\infty[$.

В пределах областей будут справедливы следующие граничные условия:

$$\delta = \delta_{0\Gamma}: V_{\ell\Gamma} = 0: \frac{\partial V_{\ell\Gamma}}{\partial \delta} = 0, \quad (7)$$

$$\delta = \delta_0: \tau = \tau_n: V_{\ell n} = V_{\ell\Gamma} = V_{\ell G}, \quad (8)$$

$$\delta = 0: \tau = \tau_p: V_{\ell G} = V_{\delta G} = 0. \quad (9)$$

С учётом граничных условий (7)-(9) уравнения (1)-(4) сводятся к следующим интегральным соотношениям:

$$\frac{1}{\ell} \frac{d}{d\ell} \ell \int_{\delta_0}^{\delta_{0\Gamma}} V_{\ell\Gamma}^2 d\delta = -v_{\Gamma} \left(\frac{\partial V_{\ell\Gamma}}{\partial \delta} \right)_{\delta=\delta_0}, \quad (10)$$

$$\frac{1}{\ell} \frac{d}{d\ell} \ell \int_0^{\delta_0} V_{\ell G}^2 d\delta = F_{\ell} \delta_0 + v_G \left\{ \left(\frac{\partial V_{\ell G}}{\partial \delta} \right)_{\delta=\delta_0} - \left(\frac{\partial V_{\ell G}}{\partial \delta} \right)_{\delta=0} \right\}. \quad (11)$$

Профиль продольной составляющей скорости можно представить в виде следующего конечного ряда от поперечной координаты:

$$V_{\ell\Gamma,G} = \sum_{i=0}^k a_i \delta^i, \quad (12)$$

где коэффициенты a_i находятся из граничных условий (7)-(9). Для определения выражения касательных составляющих напряжений через искомые параметры в области используется уравнение:

$$\int_0^{\delta_0} V_{\ell} d\delta = \frac{Q}{2\pi\ell \sin \eta}. \quad (13)$$

Подстановка профилей скорости (12) и напряжений, полученных из (13) в систему (10)-(11) позволяет свести процесс решения системы (1)-(4) к задаче Коши для обыкновенных дифференциальных уравнений с начальными условиями. Искомыми параметрами выступают δ_0 и $\delta_{0\Gamma}$. В качестве начального условия используется значение толщины плёнки жидкости δ_0 рассчитанное по формуле Хинце-Милборна /4/. Для определения начальной длины ℓ_0 можно воспользоваться результатами работы Гейзли-Чарватта /3/.

1. Область формирования ДПС в плёнке жидкости, $\ell \in]\ell_0, \ell_1]$.

В данной области искомыми параметрами, определяемыми из (5)-(6) будут толщины ДПС в газе и жидкости. В области справедливы следующие граничные условия:

$$\delta = \Delta_{d\Gamma}: C = C_{\Gamma}^{\infty}: \frac{\partial C_{\Gamma}}{\partial \delta} = 0, \quad (14)$$

$$\delta = \delta_0: C = \psi C_{nG}^*: j = D_{\Gamma\Gamma} \left(\frac{\partial C_{\Gamma}}{\partial \delta} \right) = D_{\Gamma G} \left(\frac{\partial C_G}{\partial \delta} \right), \quad (15)$$

$$\delta = \Delta_d: C = C_0: \frac{\partial C_G}{\partial \delta} = 0. \quad (16)$$

С использованием условий (14)-(16) из уравнений (5),(6) можно получить следующие интегральные соотношения:

$$\frac{1}{\ell} \frac{d}{d\ell} \ell \int_{\delta_0}^{\Delta_{d\Gamma}} V_{\ell\Gamma} C_{\Gamma} d\delta = -D_{\Gamma\Gamma} \left(\frac{\partial C_{\Gamma}}{\partial \delta} \right)_{\delta=\delta_0}, \quad (17)$$

$$\frac{1}{\ell} \frac{d}{d\ell} \ell \int_{\Delta_d}^{\delta_0} V_{\ell G} C_G d\delta = D_{\Gamma G} \left(\frac{\partial C_G}{\partial \delta} \right)_{\delta=\delta_0}. \quad (18)$$

Для аппроксимации профилей концентраций в пределах ДПС используются ряды вида (12) после замены $V_{\ell_{\Gamma G}}$ на $C_{\Gamma G}$. Коэффициенты ряда (12) находятся в области с помощью граничных условий (14)-(16).

Подстановка профилей концентраций и скоростей в (17),(18) сводит процесс решения к задаче Коши с начальными условиями для системы обыкновенных дифференциальных уравнений относительно толщин ДПС в газе и жидкости. Данные уравнения решаются методом Рунге-Кутты-Мерсона совместно с уравнениями, полученными из (10) и (11).

2. Область установления равновесия массообмена, $\ell \in [\ell_1, +\infty[$.

В области предполагаются справедливыми следующие граничные условия для уравнений (5),(6):

$$\begin{aligned} & (14), \\ & (15), \\ \delta = 0: C_G = C_p; \frac{\partial C_G}{\partial \delta} = 0. \end{aligned} \quad (19)$$

В данном случае интегральные соотношения будут иметь вид (17),(18), в которых $\Delta_d = 0$. Для нахождения профилей концентрации в пределах ДПС в газе и жидкости используются ряды вида (12). Подстановка профилей концентрации, скорости в интегральные соотношения сводит решение к задаче Коши для нахождения интегральных кривых изменения ДПС в газе и концентрации у твёрдой поверхности вдоль образующей конуса- I.

Для выражения коэффициентов массоотдачи в газе и жидкости можно использовать традиционные тождества вида:

$$\beta \left(C_{n_{\Gamma(G)}} - C_{L_{\Gamma(G)}} \right) = D_{\Gamma, \Gamma(G)} \left(\frac{\partial C_{\Gamma(G)}}{\partial \delta} \right)_{\delta=\delta_0}, \quad (20)$$

в котором средне расходная концентрация C_L находится из выражения:

$$C_{L_{\Gamma(G)}} = C_{\Gamma(0)}^\infty + \frac{\int_{\delta_0(\Delta_d)}^{\Delta_d(\delta_0)} V_{\ell_{\Gamma(G)}} C_{\Gamma(G)} d\delta}{\int_{\delta_0(0)}^{\delta_0(\delta_0)} V_{\ell_{\Gamma(G)}} d\delta}. \quad (21)$$

Результат совместного решения системы обыкновенных дифференциальных уравнений в первой области представлен на рис.2,3. Кривые получены для диска при следующих параметрах:

$$\ell_0 = 5.25 \cdot 10^{-2} (M), Q = 30 \cdot 10^{-3} \left(\frac{kg}{c} \right), \omega = 31.42 (1/c).$$

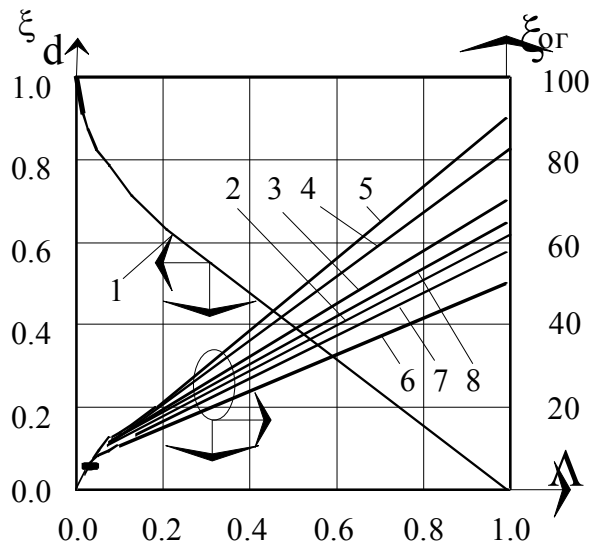


Рис.2. Изменение расчётных безразмерных толщин ДПС и динамического пограничного слоя в газе вдоль обрабатывающей вращающегося КЭ.

- 1-абсорбция аммиака и диоксида углерода водой ($T_0=278$ K);
- абсорбция аммиака водой:
- 2- $T_0=323$ (K), 3- $T_0=303$ (K),
- 4- $T_0=293$ (K), 5- $T_0=278$ (K);
- абсорбция диоксида углерода водой:
- 6- $T_0=303$ (K), 7- $T_0=293$ (K),
- 8- $T_0=283$ (K).

Результаты решения задачи во второй области представлены на рис.4.

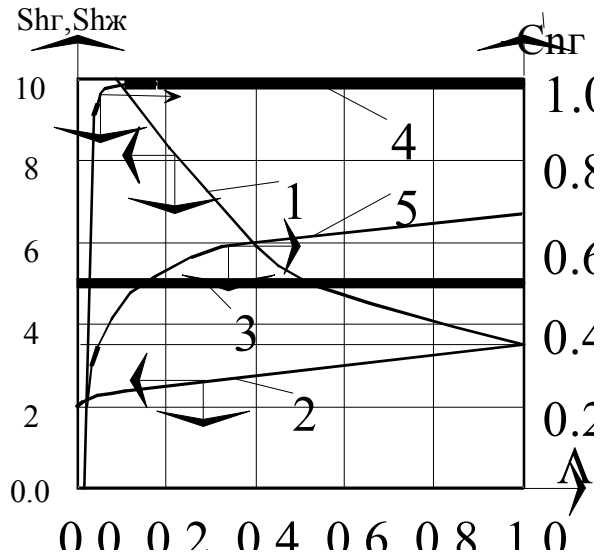
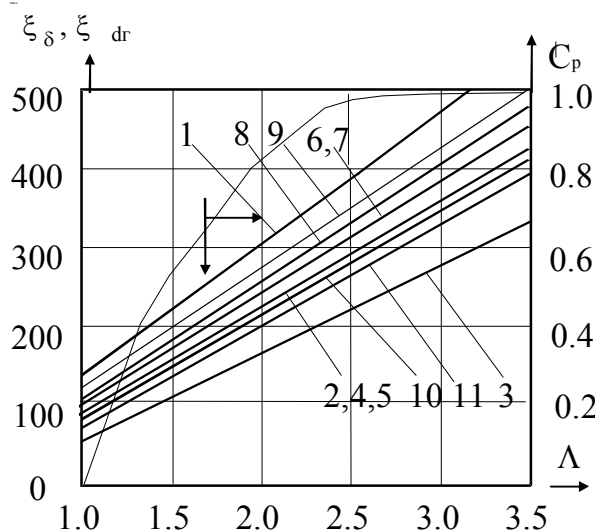


Рис.3. Расчётные зависимости критериев Шервуда в газе и жидкости, а также изменение концентрации абсорбируемого газа вдоль границы раздела фаз.

- 1- $Sh_{G\delta_0}$; 2- $Sh_{G(\delta_0-\Delta_d)}$; 3- $Sh_{Г(\Delta_d-\delta_0)}$; 4- $C_{пг}$ - -
- для системы диоксид углерода (99% масс.), воздух, вода;
- 5- $C_{пг}$ - для системы аммиак (99% масс.), воздух, вода.

Рис4. Зависимости безразмерных-концентрации абсорбируемого газа у поверхности КЭ, а также толщин динамического и диффузионного пограничных слоёв в газе.

Параметры, при которых осуществлялись расчёты кривых представлены в таблице

$$(Sc_{Г} = 1, \ell_0 = 5.25 \cdot 10^{-2} (M))$$

Таблица

№ кривой	$Q \cdot 10^3, \left(\frac{kg}{c}\right)$	n, (об/мин)	h, (град)
1-4	30	300	90

5	---	---	51.5
6	---	---	30
7	60	---	90
8	90	---	---
9	120	---	---
10	30	500	---
11	30	700	---

Выводы:

1. Критерий Шервуда в газовой фазе остаётся постоянным вдоль образующей конуса, и при $Sc_{\Gamma} = 1$ - численно равен 5. Критерий Шервуда в плёнке жидкости зависит от условий взаимодействия газа и жидкости вдоль границы раздела, их свойств и асимптотически стремится к численному значению 3.64.
2. В случае абсорбции хорошо- и среднерастворимых газов, концентрация абсорбируемого газа у границы раздела газ-жидкость- является монотонно возрастающей функцией вдоль образующей КЭ и принимает постоянное значение (в случае водной абсорбции аммиака- приблизительно в середине первой области, двуокиси углерода- в окрестности начальной точки).
3. Если толщина ДПС в жидкости описывается одной функцией, то обезразмеренная толщина динамического пограничного слоя в газе $\xi_{0\Gamma}$ -набором кривых. Эти кривые определяются как составом газа и его свойствами, так и скоростью течения плёнки жидкости. Увеличение температуры жидкости и газа приводит к уменьшению толщины $\xi_{0\Gamma}$, которая в свою очередь является одним из основных параметров, определяющих перенос абсорбируемого газа к границе раздела газ-жидкость.

Основные условные обозначения:

Переменные:

V - скорость [м/с]; $F_{\ell} = \omega^2 \ell \sin \eta - g \cos \eta$ - продольная составляющая массовой силы; ω - частота вращения КЭ [1/с]; h - половина угла при вершине конуса; n, m - кинематический и динамический коэффициенты вязкости фазы; T - температура [К] ; C - концентрация абсорбируемого газа в фазе; D - коэффициент диффузии; δ_0 - текущая толщина плёнки жидкости; b - коэффициент массоотдачи; Q - расход абсорбента; ℓ_1 - длина развития ДПС (см. рис.1); ρ - плотность; t - касательное напряжение; Sc - число Шмидта; $Sh = \frac{\beta \delta}{D}$ -критерий Шервуда.

Индексы:

o- начальная величина; Г- газ; G- жидкость; p- параметр относится к поверхности КЭ; n- параметр относится к свободной поверхности плёнки жидкости; l- продольная компонента; d- поперечная компонента; *- равновесное значение.

Сокращения:

КЭ- контактный элемент (конус); ДПС- диффузионный пограничный слой.

Список литературы:

1. Томас, Фагри, Ханки. Экспериментальный анализ и визуализация течения тонкой жидкой плёнки на неподвижном и вращающемся диске// Совр. маш., сер. А, 1991., №7- с.36-45.

2. Uchida S., Kamo H., Itoh E., Kybota A., Kawai S. Study of Mass Transfer in a Centrifugal Film Apparatus// Chem. and Eng. Technol., 1989.-v.12, №4 - с. 245-248.

3. Гейзли К., Чарват А. Поведение тонкой плёнки жидкости на вращающемся диске // Тепло- и массоперенос.- Минск: Изд. Инст. тепло массообмена АН БССР- 1968.- т.10- с. 401-419.

4. Hinse J.O., Milborn H. Atomization of liquids by means of a rotating cup// J.Appl.Mech., 1950.- v.17, №2, с.145-154.

5. Бояджиев Хр. Нелинейный массообмен между газом и стекающей плёнкой жидкости.

Ч.1. Численный анализ// ИФЖ, 1990.- т.59, №1.- с.92-98;

Ч.2. Асимптотический анализ// ИФЖ, 1990.- т.59, №2.- с.277-286;

Ч.3. Многокомпонентный массоперенос// ИФЖ, 1990.- т.59, №4.- с.593-602.

6. Мочалова Н.С., Холпанов Л.П., Шкадов В.Я. Гидродинамика и массообмен в слое жидкости на вращающейся поверхности// ИФЖ, 1973.- т.ХХV, №4, с.648-655.

☞ Мочалова Н.С., Холпанов Л.П., Шкадов В.Я. Гидродинамика и массообмен в слое жидкости на вращающейся поверхности с учётом взаимодействия с газовым потоком// ИФЖ, 1976.- т.ХХХI, №4, с.684-690.