

АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ ПОТОКОВ ПРИ СОВМЕСТНОМ ТЕЧЕНИИ ДВУХ ПЛЕНОК ВЗАИМНОНЕРАСТВОРИМЫХ ЖИДКОСТЕЙ ПО ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ С УЧЕТОМ ВОЗДЕЙСТВИЯ ГАЗОВОГО ПОТОКА.

М.К. Захаров, профессор, А.Ю. Комков, аспирант,

Д.М. Павленко, студент

кафедра Процессов и аппаратов химической технологии им. Н.И. Гельперина
МИТХТ им. М.В.Ломоносова

в **И**зучено нисходящее течение двух пленок взаимнонерасторимых жидкостей с учетом воздействия встречного газового потока. Найдены профили скоростей обеих пленок, средние скорости и расходы. Получены зависимости для расчета оптимального воздействия газового потока на рабочую пленку.

Ключевые слова взаимнонерасторимые жидкости, течение двух тонких пленок, оптимизация, скорость профиля.

Пленочные аппараты, в том числе и пленочные химические реакторы, находят все более широкое применение в различных отраслях промышленности вследствие высокой интенсивности тепло- и массообменных процессов в жидкостных пленках. К достоинствам пленочных аппаратов относят также малое и фиксированное время пребывания реакционной массы в зоне реакции. Это очень существенно для целого ряда процессов, где длительное время воздействия приводит к нежелательным явлениям (термическое разложение веществ, чувствительных к повышенной температуре; возможность протекания побочных реакций и т.д.). Однако упомянутое преимущество существенно нивелируется из-за высокой поперечной неравномерности пленочного течения, особенно при ламинарном режиме, поскольку скорость пристенных слоев жидкости ввиду их «прилипания» к стенке близка к нулю, а время пребывания этих слоев в аппарате очень велико [1]. В связи с этим целесообразно организовать течение пленки жидкости таким образом, чтобы все ее слои имели определенную (отличную от нуля) скорость относительно этой неподвижной стенки [2].

Простейший способом организации такого течения является движение пленки рабочей жидкости не по самой стенке, а по тонкой пленке «смазывающей» стенку жидкости, не обладающей взаимной растворимостью с рабочей и являющейся инертной в химическом и диффузионном смысле по отношению к реагентам и продуктам реакции [2].

При малых расходах жидкости течение рабочей пленки по инертной под действием

силы тяжести будет ламинарным. В связи с неравномерностью профиля скорости по толщине рабочей пленки существует распределение элементов потока по времени пребывания их в зоне реакции. Поэтому наблюдается некоторое отклонение от течения по модели идеального вытеснения (ИВ), согласно которой все элементы потока движутся с одинаковой скоростью и находятся в аппарате одно и то же время. Тем не менее, существует возможность приближения режима течения рабочей пленки к модели идеального вытеснения с помощью газового потока, направленного противоположно течению пленки, а также за счет варьирования толщины и других свойств инертной пленки.

Выполненный ранее [2] анализ не учитывал влияния профиля скоростей в инертной пленке. В данной работе рассмотрен общий случай течения двух (рабочей и инертной) жидкостных пленок с учетом воздействия встречного газового потока.

Аппараты с двухпленочным течением во встречном потоке газа, естественно, требуют новых методов расчета. Главным при расчете таких аппаратов является учет неравномерности профиля скорости по толщине рабочей пленки. Как известно [3], результирующий эффект аппарата целесообразно рассчитывать по формуле:

$$U_{pes} = \int_0^{\infty} U(\tau) \varphi(\tau) d\tau$$

где $U(\tau)$ – кинетическая зависимость выходной величины потока; $\varphi(\tau)$ – плотность распределения элементов жидкостного потока по времени пребывания в зоне реакции; $\varphi(\tau) d\tau$ – доля частиц с временем пребывания

от τ до $\tau + d\tau$.

Ниже найдены профили скорости в обеих пленках и оптимальное воздействие газового потока при двухпленочном течении во встречном газовом потоке. Расчет плотности распределения $\varphi(\tau)$ может быть проведен по методике, приведенной в [1, 2]. При известной кинетической зависимости процесса $U(\tau)$ и найденной плотности распределения элементов жидкостного потока по времени пребывания расчет U_{pes} не вызовет трудностей.

Для определения профилей скорости в инертной и рабочей пленках будем рассматривать их как единую систему, в которой на течение каждой пленки оказывает влияние не только газовый поток, но и характеристики другой пленки.

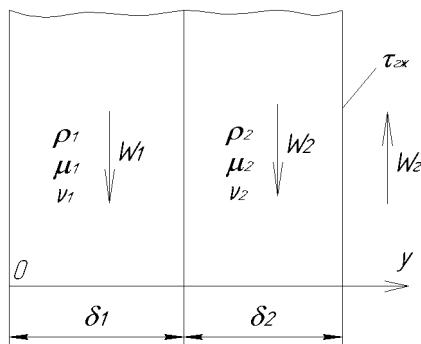


Рис. 1. Фрагмент пленок двух жидкостей, текущих во встречном газовом потоке.

Для двух ньютоновских пленок, текущих вниз во встречном потоке газа уравнение Навье-Стокса принимает вид [3]:

$$\frac{d^2W_1}{dy^2} = -\frac{g}{\nu_1} \quad \frac{d^2W_2}{dy^2} = -\frac{g}{\nu_2}$$

После первого интегрирования получаем:

$$\frac{dW_1}{dy} = -\frac{g}{\nu_1} y + C_{11} \quad (1)$$

$$\frac{dW_2}{dy} = -\frac{g}{\nu_2} y + C_{21} \quad (2)$$

После второго интегрирования:

$$W_1 = -\frac{g}{\nu_1} \cdot \frac{y^2}{2} + C_{11}y + C_{12} \quad (3)$$

$$W_2 = -\frac{g}{\nu_2} \cdot \frac{y^2}{2} + C_{21}y + C_{22} \quad (4)$$

C_{11} , C_{12} , C_{21} и C_{22} – константы интегрирования, которые можно определить из следующих граничных условий:

1) При $y = 0$ по концепции прилипания $W_1 = 0$

Из этого условия по уравнению (1) можно найти C_{12} :

$0 = 0 + 0 + C_{12}$, следовательно $C_{12} = 0$

2) При $y = \delta_1 + \delta_2$ напряжение трения на границе газ-жидкость

$$\tau_{жк} = -\mu_2 \frac{dW_2}{dy} \Big|_{y=\delta_1+\delta_2}, \text{следовательно}$$

$$\frac{dW_2}{dy} = -\frac{\tau_{жк}}{\mu_2}$$

Подставляя это в уравнение (2), имеем:

$$-\frac{\tau_{жк}}{\mu_2} = -\frac{g}{\nu_2} \cdot (\delta_1 + \delta_2) + C_{21}$$

Отсюда можно найти C_{21} :

$$C_{21} = -\frac{\tau_{жк}}{\mu_2} + \frac{g}{\nu_2} \cdot (\delta_1 + \delta_2)$$

3) При $y = \delta_1$ скорости течения обоих пленок равны: $W_1 = W_2$

С учетом уравнений (3) и (4) имеем:

$$-\frac{g}{\nu_1} \cdot \frac{\delta_1^2}{2} + C_{11}\delta_1 = -\frac{g}{\nu_2} \cdot \frac{\delta_1^2}{2} +$$

$$+ \left[-\frac{\tau_{жк}}{\mu_2} + \frac{g}{\nu_2} \cdot (\delta_1 + \delta_2) \right] \delta_1 + C_{22} \quad (5)$$

4) При $y = \delta_1$ напряжение трения на границе двух пленок равны между собой:

$$\mu_1 \frac{dW_1}{dy} = \mu_2 \frac{dW_2}{dy}$$

Тогда из уравнений (1) и (2) получаем:

$$-\frac{\mu_1 g}{\nu_1} \delta_1 + \mu_1 \cdot C_{11} = -\frac{\mu_2 g}{\nu_2} \delta_1 + \mu_2 \cdot C_{21} \quad (6)$$

Из совместного решения уравнений (5) и (6) находим константы C_{11} и C_{22} :

$$C_{11} = \frac{\rho_1 g \delta_1 + \rho_2 g \delta_2 - \tau_{жк}}{\mu_1}$$

$$C_{22} = \frac{\delta_1^2 g}{2} \left(\frac{1}{\nu_1} - \frac{1}{\nu_2} \right) + \tau_{жк} \delta_1 \left(\frac{1}{\mu_2} - \frac{1}{\mu_1} \right) +$$

$$+ \frac{g \delta_1 \delta_2}{\nu_2} \left(\frac{\mu_2}{\mu_1} - 1 \right)$$

Подставив найденные константы в уравнения (3) и (4) после преобразований получаем выражения для скорости течения жидкости в первой и второй пленках:

$$W_1 = -\frac{g}{\nu_1} \cdot \frac{y^2}{2} + \frac{\rho_1 g \delta_1 + \rho_2 g \delta_2 - \tau_{жк}}{\mu_1} y =$$

$$= \frac{g}{\nu_1} \left[-\frac{y^2}{2} + \left(\delta_1 + \frac{\rho_2 \delta_2}{\rho_1} (1 - Ge) \right) y \right] \quad (7)$$

$$W_2 = \frac{g}{\nu_2} \cdot \left[-\frac{y^2}{2} + [\delta_1 + \delta_2(1-Ge)]y + \frac{\delta_1^2}{2} \left(\frac{\nu_2}{\nu_1} - 1 \right) + \delta_1 \delta_2 \left(\frac{\mu_2}{\mu_1} - 1 \right) (1-Ge) \right] \quad (8)$$

где $Ge = \frac{\tau_{\text{жк}}}{\rho_2 g \delta_2}$ – безразмерный комплекс, характеризующий воздействие газового потока на пленку.

Объемный расход во второй пленке при ее ширине 1м равен:

$$V_2 = \int_{\delta_1}^{\delta_1 + \delta_2} W_2 dy = \frac{g \cdot \delta_2^3}{3\nu_2} - \frac{\tau_{\text{жк}} \cdot \delta_2^2}{2\mu_2} + \frac{g \cdot \delta_2 \delta_1^2}{2\nu_1} - \frac{\delta_1 \delta_2 \tau_{\text{жк}}}{\mu_1} + \frac{\delta_1 \mu_2 g \delta_2^2}{\mu_1 \nu_2} \quad (9)$$

Тогда средняя скорость во второй пленке:

$$W_2^{cp} = \frac{V_2}{\delta_2} = \frac{g \cdot \delta_2^2}{3\nu_2} - \frac{\tau_{\text{жк}} \cdot \delta_2}{2\mu_2} + \frac{g \cdot \delta_1^2}{2\nu_1} - \frac{\delta_1 \tau_{\text{жк}}}{\mu_1} + \frac{\delta_1 \mu_2 g \delta_2}{\mu_1 \nu_2}$$

После преобразований получаем:

$$W_2^{cp} = \frac{g \cdot \delta_2^2}{\nu_2} \left[\frac{1}{3} - \frac{Ge}{2} + \frac{1}{2} \frac{\nu_2}{\nu_1} \left(\frac{\delta_1}{\delta_2} \right)^2 + \frac{\delta_1 \mu_2}{\delta_2 \mu_1} (1-Ge) \right] \quad (10)$$

При $Ge = 0$ (в отсутствие газового потока) формула (10) упрощается

$$W_2^{cp} = \frac{g \cdot \delta_2^2}{\nu_2} \left[\frac{1}{3} - \frac{Ge}{2} + \frac{1}{2} \frac{\nu_2}{\nu_1} \left(\frac{\delta_1}{\delta_2} \right)^2 + \frac{\delta_1 \mu_2}{\delta_2 \mu_1} \right]$$

и, естественно, совпадает с полученной ранее [4] для двухпленочного ламинарного течения без учета воздействия газового потока.

Наиболее близким к режиму идеального вытеснения будем считать такое течение второй пленки, когда отношение максимальной скорости слоев к средней будет минимальным, то есть профиль скорости наиболее выровнен.

Для нахождения максимальной скорости во второй пленке сначала найдем расстояние

$$W_2^{\max} = \frac{g}{\nu_2} \cdot \left[-\frac{(\delta_1 + \delta_2(1-Ge))^2}{2} + [\delta_1 + \delta_2(1-Ge)]^2 + \frac{\delta_1^2}{2} \left(\frac{\nu_2}{\nu_1} - 1 \right) + \delta_1 \delta_2 \left(\frac{\mu_2}{\mu_1} - 1 \right) (1-Ge) \right]$$

и после преобразований:

$$W_2^{\max} = \frac{g \delta_2^2}{\nu_2} \cdot \left[\frac{(1-Ge)^2}{2} + \frac{1}{2} \frac{\nu_2}{\nu_1} \left(\frac{\delta_1}{\delta_2} \right)^2 + (1-Ge) \frac{\delta_1 \mu_2}{\delta_2 \mu_1} \right] \quad (11)$$

Поделив (11) на (10), находим

$$\frac{W_2^{\max}}{W_2^{cp}} = \frac{\frac{g \delta_2^2}{\nu_2} \cdot \left[\frac{(1-Ge)^2}{2} + \frac{1}{2} \frac{\nu_2}{\nu_1} \left(\frac{\delta_1}{\delta_2} \right)^2 + (1-Ge) \frac{\delta_1 \mu_2}{\delta_2 \mu_1} \right]}{\frac{g \cdot \delta_2^2}{\nu_2} \left[\frac{1}{3} - \frac{Ge}{2} + \frac{1}{2} \frac{\nu_2}{\nu_1} \left(\frac{\delta_1}{\delta_2} \right)^2 + \frac{\delta_1 \mu_2}{\delta_2 \mu_1} (1-Ge) \right]}$$

Обозначим $q = \frac{\delta_1 \mu_2}{\delta_2 \mu_1}$ и $r = \frac{1}{2} \frac{\nu_2}{\nu_1} \left(\frac{\delta_1}{\delta_2} \right)^2$, тогда

$$\frac{W_2^{\max}}{W_2^{cp}} = \frac{\frac{(1-Ge)^2}{2} + r + (1-Ge)q}{\frac{1-Ge}{2} + r + q(1-Ge)} = \frac{3(1-Ge)^2 + 6r + 6(1-Ge)q}{2 - 3Ge + 6r + 6q(1-Ge)} \quad (12)$$

Для нахождения оптимального воздействия газового потока на пленку (значение Ge) необходимо найти производную отношения

$\frac{W_2^{\max}}{W_2^{cp}}$ по Ge_{onm} и затем приравнять нулю:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dGe} \left(\frac{W_2^{\max}}{W_2^{cp}} \right) &= \frac{(-6 + 6Ge - 6q)(2 - 3Ge + 6r + 6q(1-Ge)) + (3(1-Ge)^2 + 6r + 6(1-Ge)q)(3 + 6q)}{(2 - 3Ge + 6r + 6q(1-Ge))^2} \\ \frac{d}{dGe} \left(\frac{W_2^{\max}}{W_2^{cp}} \right) &= \frac{3[(-3 - 6q)Ge^2 + (4 + 12q + 12r)Ge - 6r - 4q - 1]}{(2 - 3Ge + 6r + 6q(1-Ge))^2} \end{aligned} \quad (13)$$

Оптимальный режим достигается при $\frac{d}{dGe} \left(\frac{W_2^{\max}}{W_2^{cp}} \right) = 0$, т.е. при

$$(-3 - 6q)Ge_{onm}^2 + (4 + 12q + 12r)Ge_{onm} - 6r - 4q - 1 = 0$$

$$Ge_{onm} = \frac{2 + 6(q + r) \pm \sqrt{1 + 12q^2 + 6(1 + 6r)(q + r)}}{3 + 6q} \quad (14)$$

Изменение оптимального Ge_{onm} в зависимости от отношений параметров $\frac{\delta_1}{\delta_2}$, $\frac{\rho_1}{\rho_2}$ и $\frac{\nu_1}{\nu_2}$ представлено на рис. 2.

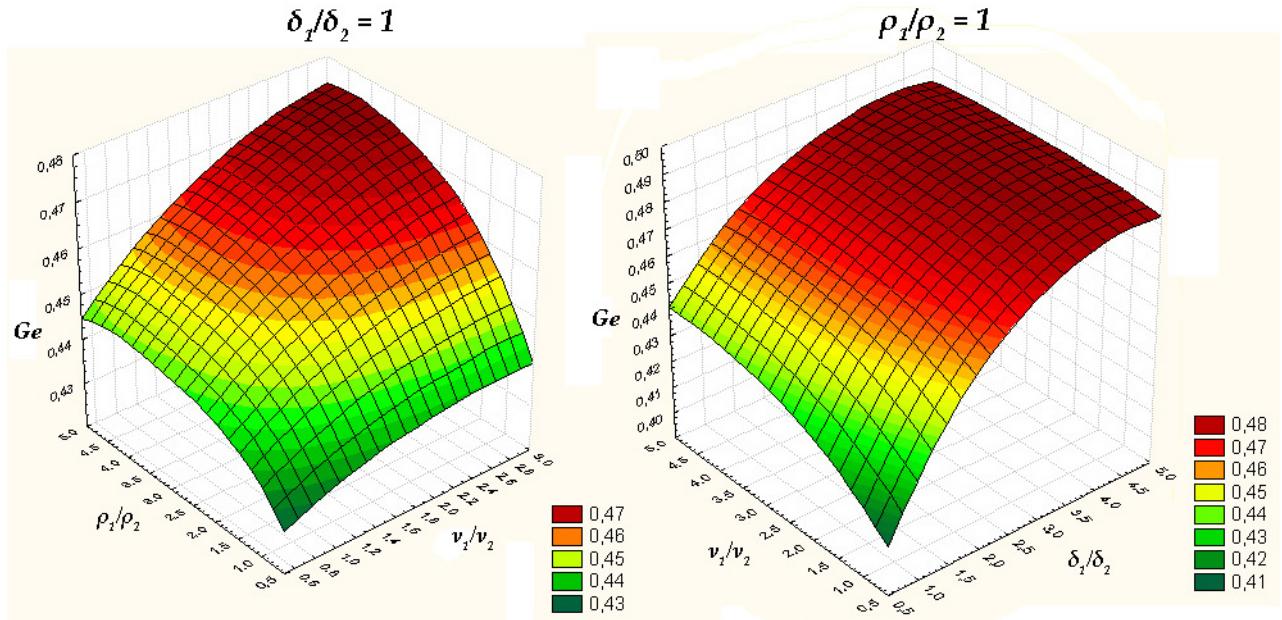


Рис. 2. Графики зависимости $Ge_{\text{опт}}$ от отношений толщин, плотностей и вязкостей пленок.

Из рисунка видно, что в выбранных диапазонах изменения параметров течения обеих пленок ($0.5 < \delta_1/\delta_2 < 5$; $0.5 < \rho_1/\rho_2 < 5$; $0.6 < \nu_1/\nu_2 < 3$) оптимальное воздействие газового потока отвечает значениям $0.41 < Ge_{onm} < 0.48$. Заметим, что при течении одной

жидкостной пленки оптимальное значение Ge_{onm} равно 0.333 [5]. При наличии инертной пленки оптимальное значение комплекса Ge_{onm} может увеличиваться до 0.5 (при больших толщинах и скоростях инертной пленки).

Обозначения

g – ускорение свободного падения, м/с²;

Ge = $\frac{\tau_{\text{ж}}}{\rho_2 g \delta_2}$ – безразмерный комплекс, отражающий воздействие газового потока на пленку;

U(τ) – кинетическая характеристика процесса;

V – объемный расход жидкостной пленки при ее ширине, равной 1м, м³/(м·с);

W – скорость, м/с;

y – расстояние от стенки, м;

δ – толщина пленки, м;

μ – динамическая вязкость жидкости, Па·с;

ν – кинематическая вязкость жидкости, м²/с;

ρ – плотность жидкости, кг/м³;

τ – время, с;

$\tau_{\text{ж}}$ – напряжение трения, Па;

$\phi(\tau)$ – плотность распределения по времени пребывания, с⁻¹

Индексы

1 – относится к первой (инертной) пленке;

2 – относится ко второй (рабочей) пленке;

гж – на границе газа и жидкости;

ср – средний;

опт – оптимальный;

min - минимальный;

max – максимальный.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Захаров, М. К. Расчет высоты пленочных реакторов при ламинарном течении пленки / М. К. Захаров, В. Г. Айнштейн, Л. М. Тишаева // Теор. основы хим. технологии. – 1988. – Т. 22, № 2. – С. 194.
2. Захаров, М. К. Расчет пленочных реакторов при ламинарном течении пленки с проскальзыванием на стенке / М. К. Захаров, В. Г. Айнштейн // Теор. основы хим. технологии. – 1992. – Т. 25, № 5. – С. 640.
3. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии / Под ред. В.Г. Айнштейна. – М. : Логос, 2002. – 1760 с.
4. Карагъозов, Х. А. Исследование гравитационного течения жидких пленок применительно к химическим реакторам : автореф. дис. . . канд. техн. наук. : 05.17.08 / Карагъозов Христо Анастасов. – М., 1981. – 20 с.
5. Захаров, М. К. Процессы переноса в аппаратах пленочного типа : дис. . . докт. техн. наук : 05.17.06 : защищена 29.03.94 / Захаров Михаил Константинович. – М., 1994. – 348 с.