

УДК 66.01  
**РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ВОСХОДЯЩЕЙ ПЛЕНКИ  
ЖИДКОСТИ**

К.В. Парняк, студент гр. ХМб-141, III курс  
Научный руководитель: Г.С. Михайлов, к.т.н., доцент  
Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева  
г. Кемерово

*В статье на основе анализа литературных данных приведены расчетные уравнения для определения основных параметров движения восходящей пленки жидкости.*

Расчет параметров движения восходящей пленки жидкости является важной технической задачей, связанной с проектированием пленочных аппаратов в химической технологии [1-11]. К расчетным параметрам жидкостных пленок относятся локальная и средняя скорости течения, толщина пленки, расход жидкости в пленке.

Аппараты с восходящей пленкой выполняются обычно в виде вертикальных кожухотрубных аппаратов [4-6] и имеют те же функциональные элементы, которые присущи аппаратам со стекающей пленкой, за исключением газораспределительного устройства. Равномерное распределение жидкости по периметру труб в этом аппарате достигается за счет воздействия газового потока. Обязательным элементом реакторов с восходящей пленкой является сепаратор-брызгоотделитель, необходимый для сепарации капель жидкости, срывааемых газом с поверхности восходящей пленки.

При противотоке двухфазных систем (например, нисходящий поток жидкости и восходящий поток газа) наблюдаются две структуры: пленочная и дисперсная. В отличие от прямотока, допускающее любое соотношение объемных расходов обеих фаз, при противотоке это соотношение ограничено. При достаточно большой скорости и плотности газового потока нисходящий внутренний поток жидкости может быть не только остановлен, но и обращен вверх (увлечен газом) [7-10]. Таким образом, в случае противотока двухфазной системы необходимо определить предельно возможные объемные расходы обеих фаз. Обе искомые величины зависят не только от скоростей и физических свойств жидкости и газа, но и от геометрической формы каналов, в которых движутся встречные фазы.

Движение свободно стекающей пленки жидкости навстречу восходящему потоку газа можно представить в соответствии с моделью (рисунок 1).

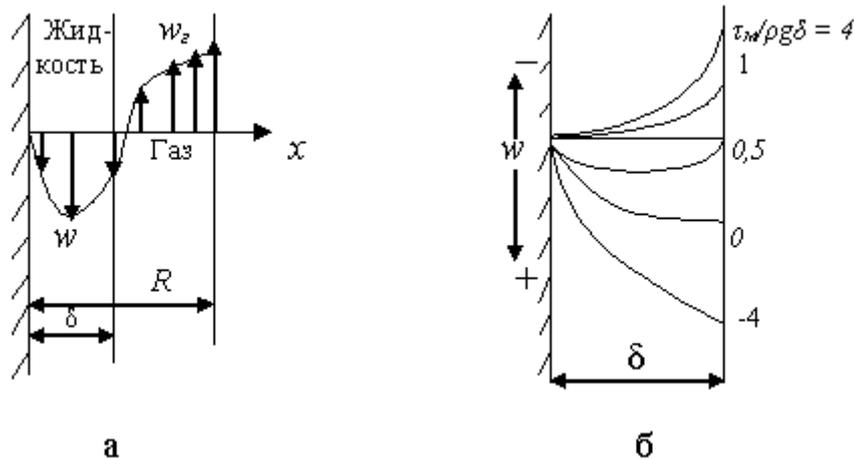


Рисунок 1 – Противоток жидкой пленки и газа:  
 а – схема противотока;  
 б – профиль скорости в сечении пленки.

Рассмотрим течение жидкой пленки шириной  $1 \times 1$  м и толщиной  $\delta$ , напишем для элементарного слоя пленки  $dx$  уравнение динамического равновесия [1]:

$$-\rho_{ж} g dx = \mu_{ж} \frac{d^2 w}{dx^2} dx, \quad (1)$$

где  $\rho_{ж}$  – плотность жидкости,  $\text{кг/м}^3$ ;

$\mu_{ж}$  – динамическая вязкость жидкости,  $\text{Па}\cdot\text{с}$ ;

$w$  – локальная скорость в пленке,  $\text{м/с}$ .

С учетом граничных условий интегрирование уравнения (1) для профиля скоростей в поперечном сечении пленки приводит к результату:

$$w = -\frac{\rho_{ж} g \delta^2}{\mu_{ж}} \left( \frac{x}{\delta} - \frac{1}{2} \cdot \frac{x^2}{\delta^2} - \frac{\tau_m}{\rho_{ж} g \delta} \cdot \frac{x}{\delta} \right), \quad (2)$$

где  $\tau_m$  – напряжение трения на границе жидкость-газ,  $\text{н/м}^2$ ;

$\delta$  – толщина пленки, м.

Поверхностная скорость жидкости на межфазной границе, где  $x=\delta$ , выразится так:

$$w = \frac{\rho_{ж} g \delta^2}{\mu_{ж}} \left( \frac{1}{2} - \frac{\tau_m}{\rho_{ж} g \delta} \right), \quad (3)$$

При  $\tau_m = 0$  выражение (3) переходит в выражение для свободно падающей пленке жидкости при отсутствии встречного потока газа. Согласно уравнению (3) профиль скоростей в пленке – параболический (рисунок 1).

При  $\tau_m / \rho g \delta = 0,5$  поверхностная скорость пленки  $w=0$ , но ее промежуточные слои в соответствии с уравнением (2), сохраняют движение вниз (рису-

нок 1, б). С увеличением  $\tau_m / \rho g \delta$  все большее количество жидкости увлекается вверх газовым потоком и меньшее ее количество продолжает двигаться вниз.

При  $\tau_m / \rho g \delta = 4$  вся пленка увлекается газом вверх (рисунок 1, б).

На основе уравнения (2) найдем среднюю скорость движения пленки [9]:

$$w_{cp} = \frac{1}{\delta} \int_0^{\delta} w dx = \frac{\rho_{жс} g \delta^2}{\mu_{жс}} \int_0^{\delta} \left( \frac{x}{\delta} - \frac{1}{2} \cdot \frac{x^2}{\delta^2} - \frac{\tau_m}{\rho_{жс} g \delta} \cdot \frac{x}{\delta} \right) dx = \frac{\rho_{жс} g \delta^2}{\mu_{жс}} \left( \frac{1}{3} - \frac{\tau_m}{2 \rho_{жс} g \delta} \right), \quad (4)$$

Расход жидкости, приходящийся на 1 м ширины пленки, выразится так:

$$V_1 = \delta w_{cp} = \frac{\rho_{жс} g \delta^3}{\mu_{жс}} \left( \frac{1}{3} - \frac{\tau_m}{2 \rho_{жс} g \delta} \right), \quad (5)$$

Величина  $\tau_m$  может быть рассчитана по потере давления газа  $\Delta P$ :

$$\tau_m = d_{\text{э}} \Delta P / 4l, \quad (6)$$

где  $d_{\text{э}}$  – эквивалентный диаметр канала газа, м;

$\Delta P$  – гидравлическое сопротивление канала газа длиной  $l$ , Па.

$$\Delta P = \lambda \frac{l}{d_{\text{э}}} \frac{w_{\Gamma}^2}{2} \rho_{\Gamma}, \quad (7)$$

где  $w_{\Gamma}$  – линейная скорость газа, м/с;

$\rho_{\Gamma}$  – плотность газа, кг/м<sup>3</sup>;

$\lambda$  – коэффициент трения.

Для потока газа внутри трубы диаметром  $d$  навстречу стекающей пленке жидкости толщиной  $\delta$  по данным [1] можно принять:

$$\lambda = \lambda_0 (1 + 300\delta/d_{\text{э}}), \quad (8)$$

где  $\lambda_0$  – коэффициент гидравлического трения при движении газа внутри неорошаемой трубы. Коэффициент  $\lambda_0$  определяется в зависимости от числа Рейнольдса для газового потока [2]:

$$\text{Re}_{\Gamma} = \frac{w_{\Gamma} \rho_{\Gamma} (d - 2\delta)}{\mu_{\Gamma}}, \quad (9)$$

Где  $d$  – внутренний диаметр трубы;

$\mu_{\Gamma}$  – динамическая вязкость газа, Па·с.

В качестве примера выполнен расчет параметров водяной пленки внутри трубы диаметром 0,2 м, высотой 1 м и скорости воздуха 14,2 м/с при  $t = 20^{\circ}\text{C}$ .

Результаты расчета:  $\lambda = 0,0825$ ;  $\Delta P = 498$  Па;  $\delta = 0,3$  мм;  $\tau_m = 2,0$  н/м<sup>2</sup>; средняя скорость движения пленки вверх  $w_{cp} = 0,374$  м/с; линейный расход воды  $V_1 = 0,000112$  м<sup>3</sup>/м·с.

Результаты работы могут быть использованы для составления методических указаний по курсу «Процессы и аппараты химической технологии».

### Список литературы:

1. Соколов, В.Н. Газожидкостные реакторы / В.Н. Соколов, И.В. Павлов. – Л: Машиностроение, 1976. – 216 с.

2. Павлов, К.Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии / К.Ф. Павлов, П.Г. Романков, А.А. Носков. – СПб: Химия, 2005. – 576 с.
3. Процессы и аппараты химической технологии. Явления переноса, макрокинетика, подобие, моделирование, проектирование: В 5 т. Т 2. Механические и гидромеханические процессы / Д.А. Баранов, В.Н. Блиничев, А.В. Вязьмин и др.; Под ред. А.М.Кутепова.– М: Логос, 2002.– 600 с.
4. Романков, П.Г. Гидромеханические процессы химической технологии / П.Г. Романков, М.И. Курочкина. – Л.: Химия, 1974. – 288 с.
5. Рамм, В.М. Абсорбция газов В.М. Рамм. – М: Химия, 1987.– 656 с.
6. Олевский, В.М. Пленочная тепло- и массообменная аппаратура / В.М. Олевский, В.Ф. Ручинский, А.М. Кашников, В.И. Чернышев. – М: Химия, 1988. – 240 с.
7. Холпанов, Л.П. Гидродинамика и теплообмен с поверхностью раздела / Л.П. Холпанов, В.Я. Шкадов. – М: Наука, 1990. – 272 с.
8. Алексеенко, С.В. Волновое течение пленок жидкости / С.В. Алексеенко, В.Е. Накоряков, Б.Г. Покусаев. – Новосибирск: Наука, 1992. – 256 с.
9. Гельперин, Н.И. Основные процессы и аппараты химической технологии. В 2-х кн. / Н.И. Гельперин. – М: Химия, 1981. – 812 с.
10. Кулов, Н.Н. Профили скорости в стекающих пленках жидкости / Н.Н. Кулов, М.Ю. Муравьев, В.А. Малюсов, Н.М. Жаворонков // ТОХТ. – 1982. – Т. 16. – № 4-1. – С. 499-509.
11. Mikhailov, G.S. The contents of toxic and corrosive components in coke combustion gaseous products / G.S. Mikhailov, Yu.O. Afanasev, V.A. Plotnikov, Kh.A. Iskhakov, S.D. Tikhov, A.I. Gaus, P.D. Nagibin // Кокс и химия. – 1996. – № 8. – С. 32-34.