



УДК 66.021.3

А.М. Волк, канд. техн. наук, Д.Ю. Мытько (Белорусский государственный технологический университет, г. Минск, Республика Беларусь) E-mail: anatoliyvolk@mail.ru

Исследование пленочного течения жидкости в перфорированном цилиндрическом канале регулярно-структурированной насадки

На предприятиях химической и нефтехимической отраслей промышленности для проведения массообменных процессов (например для очистки газов) широко применяются тарельчатые и насадочные колонны. Преимущества насадочных колонн перед тарельчатыми — низкое гидравлическое сопротивление, высокая эффективность, широкий интервал параметров устойчивой работы [1].

Среди различных типов регулярных и нерегулярных насадок массообменных колонн перспективны регулярно-структурированные насадки — пакеты гофрированных листов металла, собранных с образованием структурированных каналов одинаковой площади поперечного сечения (цилиндрических, шестигранных, ромбовидных) с учетом равномерного распределения каналов регулярно-структурированной насадки в поперечном сечении массообменной колонны. Применением насадок такой конструкции для проведения массообменных процессов обеспечиваются хорошее смачивание насадки и высокая удельная поверхность без образования застойных зон [2], однако с увеличением диаметра насадочной колонны увеличивается неравномерность распределения жидкости по сечению колонны, что существенно влияет на эффективность массопередачи и качество готового продукта [3].

Следовательно, совершенствование насадочных аппаратов с учетом снижения неравномерности распределения жидкости в многоканальных контактных устройствах является актуальной задачей.

Для улучшения распределения жидкости регулярно-структурированные насадки изготавливаются из перфорированных листов (пример — широко известная насадка Mellapak). Перфорация листов способствует повышению турбулентности газожидкостных потоков и интенсификации проводимого процесса в связи с возможностью перераспределения части жидкости через отверстия на стенки других каналов (при этом увеличиваются площадь поверхности контакта фаз и равномерность распределения жидкости в слое насадки).

На поверхности регулярно-структурированной насадки реализуется пленочное течение жидкости. В связи с широким применением пленочных течений (в химических аппаратах, ракетных двигателях, установках по опреснению соленой морской воды и т.д.) актуальны исследования гидродинамики движения жидкости на поверхности каналов [3].

По результатам экспериментальных исследований гидродинамики пленочного течения на плоской стенке и на цилиндрической поверхности были получены фун-

даментальные математические модели движения пленки жидкости [4—6], которые являются основой для дальнейших исследований.

Цель работы — расчет гидродинамических характеристик пленочного течения на перфорированной поверхности цилиндрического канала регулярно-структурированной насадки.

Для расчета была разработана математическая модель и проведены экспериментальные исследования.

Математическая модель двухфазного пленочного движения на проницаемой цилиндрической поверхности

Пленочные течения на плоской и цилиндрических поверхностях исследованы достаточно подробно [4—10], но практически нет моделей пленочных течений на перфорированных поверхностях.

Объект исследования — стационарное осесимметричное движение пленки вязкой несжимаемой жидкости под воздействием закрученного газового потока по внутренней стенке проницаемого цилиндра (рис. 1).

Степень закрутки газового потока в разработанной математической модели задана тангенсом угла. Взаимодействие фаз определяется касательным напряжением на границе раздела и учитывается в граничных условиях при решении дифференциальных уравнений модели.

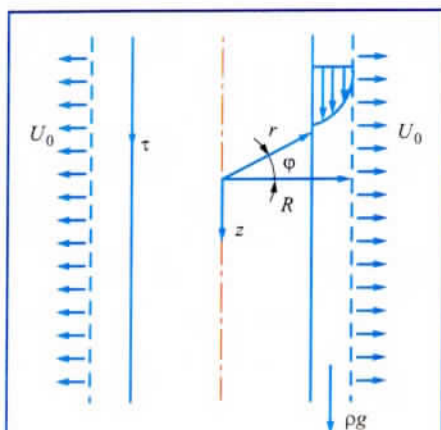


Рис. 1. Схема двухфазного пленочного течения жидкости на перфорированной цилиндрической поверхности

Уравнения Навье — Стокса для составляющих скорости жидкой фазы и уравнение неразрывности [9] (с учетом того, что в силу осесимметричности $\partial U_z / \partial \varphi = 0$) примут вид:

$$\rho \left(U_r \frac{\partial U_z}{\partial r} + U_z \frac{\partial U_z}{\partial z} \right) = \rho g - \frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 U_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U_z}{\partial r} + \frac{\partial^2 U_z}{\partial z^2} \right); \quad (1)$$

$$\rho \left(U_r \frac{\partial U_\varphi}{\partial r} + \frac{U_\varphi U_r}{r} \right) = \mu \left(\frac{\partial^2 U_\varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U_\varphi}{\partial r} - \frac{U_\varphi}{r^2} \right); \quad (2)$$

$$\rho \left(U_r \frac{\partial U_r}{\partial r} - \frac{U_\varphi^2}{r} \right) = -\frac{\partial P}{\partial r} + \mu \left(\frac{\partial^2 U_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U_r}{\partial r} - \frac{U_r}{r^2} \right); \quad (3)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r U_r) + \frac{\partial U_z}{\partial z} = 0, \quad (4)$$

где z, φ, r — полярная система координат; P — давление, Па; U_z, U_φ, U_r — осевая, тангенциальная и радиальная скорости жидкой фазы, м/с; ρ — плотность жидкости, кг/м³; μ — коэффициент динамической вязкости жидкости, Н·с/м²; g — ускорение свободного падения, м/с².

Скорость оттока жидкой фазы U_0 на некотором элементарном цилиндре (радиусом R , длиной Δz) принята постоянной. Значения объемного расхода несжимаемой

жидкости через цилиндрические поверхности равной длины будут одинаковы: $2\pi r U_r \Delta z = 2\pi R U_0 \Delta z$, при этом радиальная скорость в пленке жидкости составит $U_r = U_0 R / r$. Тогда из уравнения неразрывности (4) следует: $\partial U_z / \partial z = 0$; $U_z = U_z(r)$.

Принято: $\psi = \partial P / \partial z = \text{const}$; $\nu = \mu / \rho$ — коэффициент кинематической вязкости жидкости. Тогда уравнения (1)–(3) примут вид:

$$\frac{d^2 U_z}{dr^2} - \frac{1}{r} \left(\frac{U_0 R}{\nu} - 1 \right) \frac{dU_z}{dr} = -\frac{\rho g - \psi}{\mu}; \quad (5)$$

$$\frac{d^2 U_\varphi}{dr^2} - \frac{1}{r} \left(\frac{U_0 R}{\nu} - 1 \right) \frac{dU_\varphi}{dr} - \frac{1}{r^2} \left(\frac{U_0 R}{\nu} + 1 \right) U_\varphi = 0; \quad (6)$$

$$\frac{\partial P}{\partial r} = \rho \left(\frac{U_\varphi^2}{r} + \frac{U_0^2 R^2}{r^3} \right). \quad (7)$$

В результате получена система обыкновенных дифференциальных уравнений (5)–(7), решение которой $U = U(r)$ будет автомодельным. При переходе к безразмерной координате $\bar{r} = r/R$ с учетом обозначения $\alpha = U_0 R / \nu$ получены уравнения:

$$\frac{d^2 U_z}{d\bar{r}^2} - \frac{(\alpha - 1)}{\bar{r}} \frac{dU_z}{d\bar{r}} = -\frac{\rho g - \psi}{\mu} R^2; \quad (8)$$

$$\frac{d^2 U_\varphi}{d\bar{r}^2} - \frac{(\alpha - 1)}{\bar{r}} \frac{dU_\varphi}{d\bar{r}} - \frac{(\alpha + 1)}{\bar{r}^2} U_\varphi = 0. \quad (9)$$

Компоненты тензора касательных напряжений рассчитываются по формулам:

$$\tau_z = -\mu \frac{\partial U_z}{\partial r}; \quad (10)$$

$$\tau_\varphi = -\mu \left(\frac{\partial U_\varphi}{\partial r} - \frac{U_\varphi}{r} \right).$$

При определении фундаментальной системы решений уравнений (8), (9) в виде r^k получены общие решения:

$$U_z = c_1 + c_2 \bar{r}^\alpha + \frac{\rho g - \psi}{2\mu(\alpha - 1)} \bar{r}^2; \quad (11)$$

$$U_\varphi = \frac{c_3}{\bar{r}} + c_4 \bar{r}^{\alpha+1}, \quad (12)$$

где c_1, c_2, c_3, c_4 — произвольные коэффициенты.

В качестве начальных условий принято равенство нулю осевой и касательной составляющих скоро-

сти жидкости на проницаемой поверхности:

$$U_z|_{\bar{r}=1} = U_\varphi|_{\bar{r}=1} = 0. \quad (13)$$

В качестве граничных условий принято равенство касательных напряжений (10), (11) на границе раздела фаз:

$$\tau_z = -\frac{\mu}{R} \frac{dU_z}{d\bar{r}} \Big|_{\bar{r}=1-\bar{\delta}}; \quad (14)$$

$$\tau_\varphi = -\mu \left(\frac{\partial U_\varphi}{R \partial \bar{r}} - \frac{U_\varphi}{R \bar{r}} \right) \Big|_{\bar{r}=1-\bar{\delta}},$$

где $\bar{\delta} = \delta/R$ — относительная толщина пленки жидкости; δ — толщина пленки жидкости.

На границе раздела фаз на газовый поток действуют силы, создаваемые перепадом давления и касательными напряжениями в пленке жидкости. Из условия равновесия этих сил [10]

$$\pi (R - \bar{\delta})^2 \Delta P = 2\pi (R - \bar{\delta}) \tau_z l \quad (15)$$

получена формула:

$$\psi = \frac{\Delta P}{l} = \frac{2\tau_z}{R(1-\bar{\delta})} = -\frac{2\tau_z}{R(1-\bar{\delta})}, \quad (16)$$

где l — длина цилиндра, м; ΔP — перепад давления газового потока по длине цилиндра, Па/м.

С учетом условий (14)–(16) получены формулы распределения скорости в пленке жидкости:

$$U_z = \left[\frac{\tau_z R}{\mu(\alpha - 2)(1 - \bar{\delta})^{\alpha-1}} + \frac{\rho g R^2}{\mu\alpha(\alpha - 2)(1 - \bar{\delta})^{\alpha-2}} \right] (1 - \bar{r}^\alpha) - \left[\frac{\rho g R^2}{2\mu\alpha(\alpha - 2)} + \frac{\tau_z R}{\mu(\alpha - 2)(1 - \bar{\delta})} \right] (1 - \bar{r}^2); \quad (17)$$

$$U_\varphi = \frac{R\tau_\varphi (1 - \bar{\delta})^2}{\mu\alpha(1 - \bar{\delta})^{\alpha+2} + 2\mu} \left(\frac{1}{\bar{r}} - \bar{r}^{\alpha+1} \right). \quad (18)$$

Объемный расход жидкой фазы на единицу периметра канала:

$$q = R \int_{1-\bar{\delta}}^1 U_z \bar{r} d\bar{r} = \left[\frac{\tau_z R^2}{\mu(\alpha - 2)(1 - \bar{\delta})^{\alpha-1}} + \frac{\rho g R^3}{\mu\alpha(\alpha - 2)(1 - \bar{\delta})^{\alpha-2}} \right] \times$$

$$\times \left[\frac{1 - (1 - \bar{\delta})^2}{2} - \frac{1 - (1 - \bar{\delta})^{\alpha+2}}{\alpha + 2} \right] - \left[\frac{\rho g R^3}{2\mu(\alpha - 2)} + \frac{\tau_z R^2}{\mu(\alpha - 2)(1 - \bar{\delta})} \right] \times \left[\frac{1 - (1 - \bar{\delta})^2}{2} - \frac{1 - (1 - \bar{\delta})^4}{4} \right]. \quad (19)$$

Изменение объемного расхода q по длине канала отражено уравнением:

$$dq/dz = -U_0. \quad (20)$$

Число Рейнольдса для пленки жидкой фазы определяется по формуле:

$$Re_{\delta} = 4q/v. \quad (21)$$

Правую часть равенства (19) разложим в ряд до четвертой степени:

$$q = \frac{\tau_z R^2}{\mu} \left[\frac{\bar{\delta}^2}{2} + \frac{2\alpha \bar{\delta}^3}{3!} + \frac{3(\alpha^2 + 1)\bar{\delta}^4}{4!} + \dots \right] + \frac{\rho g R^3}{\mu} \left[\frac{2\bar{\delta}^3}{3!} + \frac{3\alpha - 8}{4!} \bar{\delta}^4 + \dots \right] = \frac{\tau_z \bar{\delta}^2}{\mu} \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{3} \frac{U_0 \bar{\delta}}{v} + \frac{1}{8} \left(\frac{U_0^2 \bar{\delta}^2}{v^2} + \frac{\bar{\delta}^2}{R^2} \right) + \dots \right] + \frac{\rho g \bar{\delta}^3}{\mu} \left[\frac{1}{3} + \frac{1}{24} \left(3 \frac{U_0 \bar{\delta}}{v} - 8 \frac{\bar{\delta}}{R} \right) + \dots \right]. \quad (22)$$

Из уравнения (22) следует: гидродинамические характеристики пленочного течения изменяются вследствие оттока жидкой фазы, когда значение безразмерного комплекса Рейнольдса $U_0 \bar{\delta}/v$ соизмеримо с единицей.

Среднее значение тангенциальной составляющей скорости пленки определяется по формуле:

$$\bar{U}_{\varphi} = \frac{1}{\bar{\delta}} \int_{1-\bar{\delta}}^1 U_{\varphi} d\bar{r} = \frac{R\tau_{\varphi}}{\bar{\delta}\mu} \frac{(1-\bar{\delta})^2}{\alpha(1-\bar{\delta})^{\alpha+2} + 2} \times \left[\frac{1}{\alpha+2} - \frac{(1-\bar{\delta})^{\alpha+2}}{\alpha+2} - \ln(1-\bar{\delta}) \right]. \quad (23)$$

Перепад давления в радиальном направлении определяется по формуле

$$\Delta P_r = \rho \int_{1-\bar{d}}^1 \left(\frac{U_{\varphi}^2}{r} + \frac{U_0^2 R^2}{r^3} \right) d\bar{r}. \quad (24)$$

Полученная математическая модель — возможность расчета основных гидродинамических характеристик движения жидкой пленки при заданных геометрических размерах перфорированного канала регулярно-структурированной насадки, а также значениях расходов газа и жидкости, скорости и давления газового потока.

Воздействие газового потока на пленку жидкости передается силами поверхностного трения, волновая поверхность пленки рассматривается как нерегулярная шероховатость. При этом с учетом степени закрутки газового потока компоненты тензора касательных напряжений рассчитываются по формулам [10, 11]:

$$\tau_z = \frac{0,3164}{Re_{\Gamma}^{0,25}} \frac{\rho_{\Gamma} W^2}{8} \left(1 + \frac{300\bar{\delta}}{D} \right); \quad \tau_{\varphi} = \frac{\tau_z}{\operatorname{tg}\alpha}, \quad (25)$$

где D — диаметр цилиндрической поверхности, м; ρ_{Γ} — плотность газа, кг/м³; W — среднерасходная скорость газового потока, м/с; Re_{Γ} — число Рейнольдса для газового потока.

Число Рейнольдса для газа определяется по формуле:

$$Re_{\Gamma} = WD/v_{\Gamma}. \quad (26)$$

Средняя скорость пленки жидкости рассчитывается по уравнению

$$\bar{U}_z = q/\bar{\delta}. \quad (27)$$

Экспериментальные исследования гидродинамики жидкой пленки на проницаемой поверхности

Для проверки теоретической модели и определения коэффициентов модели выполнены экспериментальные исследования пленочного течения для системы воздух — вода в цилиндрическом

проницаемом элементе на основе металлокерамики из порошков малоуглеродистых сталей (размер отверстий в проницаемом элементе — 40 мкм, проницаемость — 20 %, диаметр цилиндра — 0,05 м, длина цилиндра — 2 м). Среднерасходная скорость газа — 9 м/с.

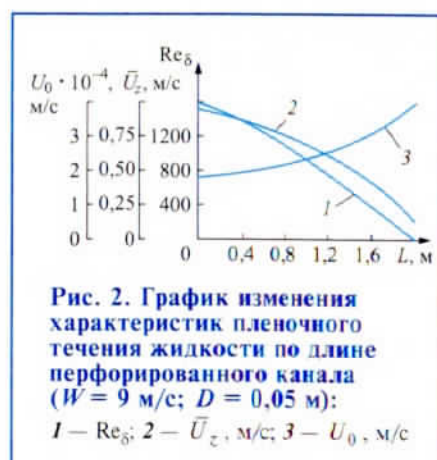
Скорость оттока жидкой фазы U_0 на основании закона Дарси определяется сопротивлением перфорированной стенки $R_{п.с}$ и перепадом давления, создаваемого газовым потоком и закрученной пленкой жидкости, рассчитанными на основании теоретической модели:

$$U_0 = \gamma \frac{\Delta P}{\mu R_{п.с}} = \frac{\Delta P \left(1 - \exp \left(-m \sqrt{\Delta P / (\rho \bar{U}_z^2)} \right) \right)}{\mu R_{п.с}}. \quad (28)$$

По данным эксперимента определено сопротивление перегородки $R_{п.с} = 7 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-1}$. Влияние скорости пленки на отток жидкой фазы учтено коэффициентом γ , зависящим от отношения перепада давления на стенке к скоростному напору пленки [12]. При сопоставлении результатов расчетов и данных эксперимента определено значение поправочного коэффициента $m = 0,2$.

Гидродинамические характеристики процесса пленочного течения, рассчитанные по математической модели, с учетом их изменения по длине перфорированного канала приведены на рис. 2.

В результате расчетов с применением разработанной математической модели пленочного движения жид-



кости по внутренней стенке перфорированного канала получены следующие гидродинамические характеристики: средняя толщина пленки жидкости — 440 мкм; средняя осевая скорость пленки — 0,7 м/с.

Профиль осевой составляющей скорости характеризуется достаточно большим градиентом скорости на перфорированной поверхности. На расстоянии 0,3 мкм от поверхности канала осевая составляющая скорости на порядок выше радиальной составляющей, на расстоянии 3 мкм — осевая составляющая скорости на два порядка выше радиальной составляющей.

Выводы

По результатам выполненных исследований определены основные гидродинамические характеристики пленочного движения жидкой фазы в диапазоне значений числа Рейнольдса (и, следовательно, объемного расхода жидкости) до $Re_{\delta} = 1600$.

Разработана математическая модель, применение которой позволит определять оптимальные соотношения геометрических и режимных параметров пленочного движения жидкой фазы в перфорированном цилиндрическом канале под воздействием закрученного газового потока.

Список литературы

1. Рамм В.М. Абсорбция газов. М.: Химия. 1976. 656 с. 2. Фарахов М.И., Лаптев А.Г., Башаров М.М. Модернизация массообменных аппаратов новыми насадками в химической технологии // Теоретические основы химической технологии. 2015. Т. 49. № 3. С. 247—252. 3. Павленко А.Н., Суртаев А.С., Володин О.А., Сердюков В.С. Особенности пленочного течения жидкого азота по корругированным пластинам с комбинированной микротекстурой // Сибирский физический журнал. 2017. Т. 12. № 2. С. 75—84. 4. Левич В.Г. Фи-

зико-химическая гидродинамика. М.: Физматгиз. 1959. 699 с. 5. Алексеенко С.В., Накоряков В.Е., Покусаев Б.Г. Волновое течение пленок жидкости. Новосибирск: Наука. 1992. 256 с. 6. Тананайко Ю.М., Воронцов Е.В. Методы расчета и исследование пленочных процессов. Киев: Техника. 1975. 311 с. 7. Ерощенко В.М., Зайчик Л.И. Гидродинамика и теплообмен на проницаемых поверхностях. М.: Наука. 1984. 274 с. 8. Бояджиев Х., Бешков В. Массоперенос в движущихся пленках жидкости. М.: Мир. 1988. 136 с. 9. Берд Р., Стьюарт В., Лайтфут Е. Явления переноса. М.: Химия. 1974. 688 с. 10. Соколов В.И., Доманский И.В. Газожидкостные реакторы. Л.: Машиностроение. 1976. 216 с. 11. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука. 1969. 742 с. 12. Рекин А.Д. Экспериментальное определение коэффициента истечения из канала через перфорированные стенки // Инженерно-физический журнал. 1982. Т. 43. № 1. С. 54—58.

УДК 621.593

Е.В. Семенов, д-р техн. наук, В.А. Ирха, канд. физ.-мат. наук, М.В. Клоконос, канд. техн. наук (Московский государственный университет технологий и управления имени К.Г. Разумовского (Первый казачий университет), Россия); Б.С. Бабакин, д-р техн. наук, С.Б. Бабакин, канд. техн. наук, А.Н. Сучков (Всероссийский научно-исследовательский институт холодильной промышленности — филиал ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН, Россия) E-mail: sem-post@mail.ru

Терморегулирование воздушной среды в контейнере системой замороженных капсул*

Во многих случаях для стабилизации физических свойств различных субстанций при их длительном хранении необходимо поддержание заданной температуры среды (воздушной или жидкостной). Одно из направлений интенсификации производственных процессов химической, нефтегазовой, пищевой и других отраслей промышленности связано с сохранением качественных показателей сырья и продукции путем управляемого охлаждения обрабатываемой среды

с применением энергосберегающей холодильной техники.

Одним из перспективных способов охлаждения жидкостных сред является введение в среду тел — аккумуляторов холода (обычно шарообразной формы), содержащих охлажденные до низких температур растворы [1]. В частности, технологический способ охлаждения среды с использованием шаров в качестве теплоносителей применяется в металлургии [2].

По результатам исследований в области водоподготовки охлажде-

нием водной среды с применением замороженных емкостей [1] выявлены преимущества этого способа перед другими способами охлаждения (конвективным, пленочным и др.): высокая интенсивность процесса, низкие энергозатраты.

С учетом высокого значения теплоты плавления водного льда (по сравнению с другими субстанциями) и ряда других его свойств скопление наполненных водным льдом капсул (шаров) считается наиболее целесообразным для при-

*Исследование выполнено при поддержке Российского Фонда Фундаментальных исследований, проект № 20-316-90043.