

статора. Рис. 2а соответствует случаю $d_d = 0,22 \cdot 10^{-3}$ м, а рис. 2б - случаю $d_d = 0,22 \cdot 10^{-4}$ м. Как видно из рисунка, частица меньшего диаметра гораздо быстрее прошла циркуляционную зону канала ротора и покинула рабочее пространство аппарата не разрушившись. В течении всего времени нахождения этой частицы в аппарате, рассчитанная для нее величина числа We не превышала 10.

Выводы

В результате проведенных исследований были построены траектории движения дисперсных частиц в двухфазном потоке жидкости, обрабатываемой в РПА. Формы траекторий частиц существенно зависят от начального положения частицы на входе в рабочее пространство РПА, а также от размера частицы. В рассматриваемом случае большинство сферических частиц, диаметр которых составляет $d_d = 0,22 \cdot 10^{-3}$ м, попадает в вихревую зону канала ротора и пребывает в ней сравнительно длительное время. В вихревой зоне вели-

чины чисел We , рассчитанные по относительной скорости частиц, превышают критическое значение 12. Поэтому данные частицы вероятнее всего разрушаются в канале ротора. Частицы же, диаметры которых на порядок меньше, не достигают относительной скорости, при которой $We > 12$. Поэтому, вероятность их дробления в рабочем пространстве РПА - значительно ниже.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Иваницкий Г.К.* Моделирование процесса деформирования и дробления капель при движении в жидкости // Промышленная теплотехника. - 1997. - Т. 19. - № 1. - С. 8-16.
2. *Басок Б.И., Давыденко Б.В., Кравченко Ю.С., Пироженко И.А.* Исследование микроструктуры потока жидкости в роторно-пульсационном аппарате // Доповіді Національної академії наук України.- 2003.- № 11.- С. 71-76.
3. *Нигматулин Р.И.* Динамика многофазных сред. Ч. 1.- М: Наука, 1987.- 464 с.

Получено 08.10.2004 г.

УДК 536.422

Дикий Н.А., Шовкалюк Ю.В.

Национальный технический университет Украины „Киевский политехнический институт”

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ ЭЛЕМЕНТА ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНОЙ НАСАДКИ С ЭКРАНИРОВАННОЙ ВОДЯНОЙ ПЛЕНКОЙ

Наведено результати експериментального дослідження гідродинаміки при протитоковому русі плівки рідини та потоку газу в елементі плоскопаралельної насадки при низьких густинах зрошення. рекомендовано узагальнюючі залежності для розрахунку аеродинамічного опору та коефіцієнту гідравлічного опору елементу плоскопаралельної насадки з екранованою водяною плівкою.

Представлены результаты экспериментального исследования гидродинамики при противоточном движении пленки жидкости и потока газа в элементе плоскопараллельной насадки при низких плотностях орошения. Рекомендованы обобщающие зависимости для расчета аэродинамического сопротивления и коэффициента гидравлического сопротивления элемента плоскопараллельной насадки с экранированной водяной пленкой.

Experimental results of hydrodynamics at opposite flow of film of liquid and gas flow in the element of plane-parallel nozzle at low water concentration are presented. recommended here are generalized dependencies for aerodynamic resistance calculation and hydraulic resistance factor of element of plane-parallel nozzle with screened water film.

ΔP – аэродинамическое сопротивление, Па;
 ξ – коэффициент сопротивления;
 $w_{\text{возд}}$ – скорость воздуха, м/с;
 T – температура, °С;
 $Re_{\text{возд}}$ – число Рейнольдса для воздуха;
 $Re_{\text{ж}}$ – число Рейнольдса для жидкости;

Γ – плотность орошения, кг/(м·с);
 ППН – плоскопараллельная насадка.

Индексы:

ж – вода;
 возд – газ.

Введение и постановка задачи

Одним из главных направлений повышения эффективности процессов тепло-массообмена в контактных аппаратах является увеличение скоростей движущихся фаз (жидкой и газообразной). Однако максимальная скорость газообразной фазы в значительной степени зависит от плотности орошения. Для исключения уноса в исследуемом диапазоне скоростей нами применено экранирование водяной пленки полупрозрачным экраном.

В представленном материале приведены результаты исследования гидродинамики при противоточном движении пленки жидкости и потока газа в элементе плоскопараллельной насадки с экранированной водяной пленкой при различных плотностях орошения и различных скоростях движения газовой фазы.

Описание установки и проведение экспериментов

Экспериментальная установка для исследования гидродинамики ППН представлена на рис. 1.

В качестве жидкой фазы используется вода, в качестве газовой – воздух. Движение жидкой и газовой фаз противоточное.

Установка состоит из исследуемого рабочего участка, участка гидродинамической стабилизации, системы подачи, подогрева и отведения воздуха и воды при противоточном движении и контрольно-измерительной аппаратуры.

Температуры измерялись хромель-алюмелевыми термопарами, которые устанавливались непосредственно на входе и выходе исследуемого участка. Перепад давления на расчетном участке измерялся с помощью микродифманометра ММН с наклоненной трубкой. Перед исследуемым участком устанавливался участок гидродинамической стабилизации. Для обеспечения адиабатных

условий исследуемый участок и участок гидродинамической стабилизации изолировались от окружающей среды.

Воздух, подаваемый компрессором (6) через ротаметры (8) подается в канал (5) прямоугольного сечения. Регулирование расхода воздуха осуществляется заслонками (7). Движение воздуха – снизу вверх. В канале размещается рабочий участок (2), представляющий собой пластину из нержавеющей стали, с обеих сторон которой методом контактной сварки крепится нержавеющая сетка. Вода через регулирующий вентиль (9) и ротаметр (10) подается в распределитель жидкости

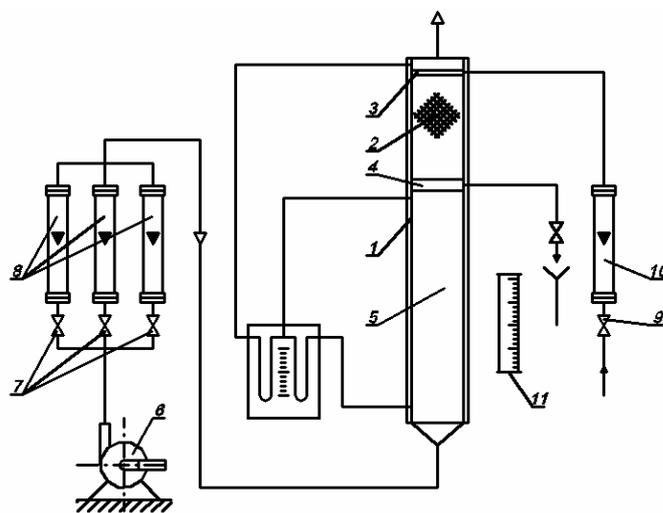


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 - корпус установки; 2 - рабочий участок; 3 - распределитель жидкости; 4 - приемное приспособление для жидкости; 5 - канал; 6 - компрессор; 7 - регулирующие заслонки для воздуха; 8 - ротаметр по воздуху; 9 - регулирующий вентиль для жидкости; 10 - ротаметр по жидкости; 11 - мерный сосуд.

(3) в котором она равномерно распределяется по периметру рабочего участка. Вода в виде тонкой пленки движется сверху вниз. Пройдя рабочий участок, вода собирается в приемный желобок (4) и отводится из установки.

Как известно, сопротивление насыпных насадок в несколько раз больше сопротивления регулярных и плоскопараллельных (ППН) насадок, это большей частью обусловлено многократным изменением направления движения потока газа и изменением площади проходного сечения.

В задачу исследования входило определение сопротивления ΔP сухой и орошаемой насадки в зависимости от скорости $w_{\text{возд}}$ воздушного потока при низких плотностях орошения.

Результаты экспериментов

На рис. 2 в логарифмической системе координат показана зависимость удельного сопротивления $\Delta P/H$ одиночного щелевого канала сухой плоскопараллельной насадки от скорости воздуха $w_{\text{возд}}$, рассчитанного для свободного сечения щелевого канала.

Кривая $\Delta P/H$ от $w_{\text{возд}}$ имеет ярко выраженный разрыв. В точке разрыва происходит переход режима течения воздуха из ламинарного в турбулентный (при числе $Re=2600$).

Для определения аэродинамического сопротивления ΔP сухой плоскопараллельной насадки использовалась зависимость

$$\Delta P = \xi \cdot \frac{l}{d_{\text{экв}}} \cdot \frac{\rho_{\text{возд}} \cdot w_{\text{возд}}^2}{2} \quad (1)$$

где ξ - коэффициент сопротивления; l - высота элемента насадки (одиночного щелевого канала); $d_{\text{экв}}$ - эквивалентный диаметр насадки (одиночного щелевого канала); $\rho_{\text{возд}}$ - плотность воздуха.

На рис. 3 приведена зависимость $\xi = f(Re_{\text{возд}})$ для элемента сухой плоскопараллельной насадки.

В результате экспериментальных исследований получены критериальные зависимости для определения коэффициентов сопротивления воздушного потока. Эти зависимости имеют ярко выраженное изменение показателя степени числа Re получаемое вследствие изменения наклона кривых $\xi = f(Re)$. Изменение показателя происходит в месте разрыва кривой.

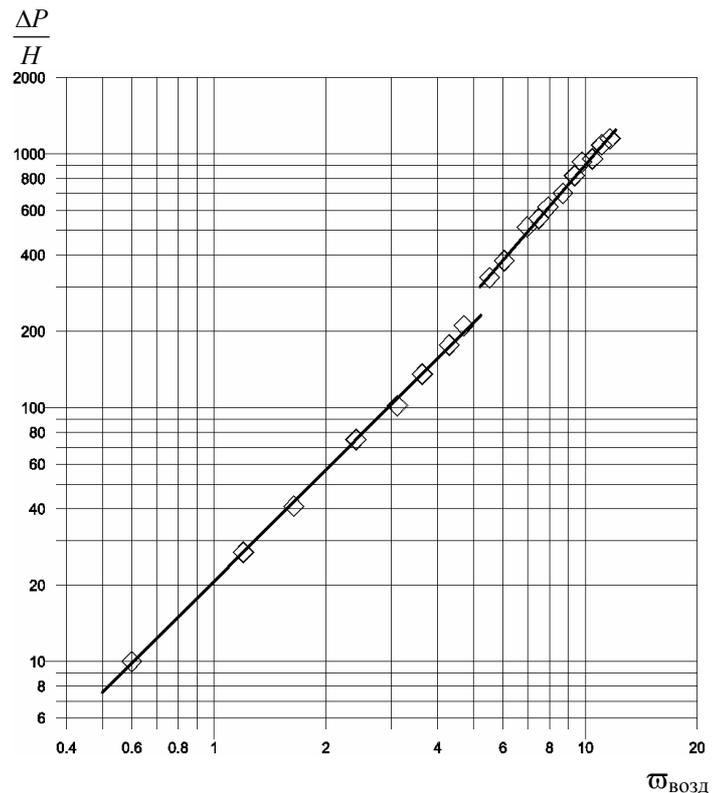


Рис. 2. Зависимость удельного аэродинамического сопротивления элемента сухой плоскопараллельной насадки с экранированной водяной пленкой от скорости воздуха.

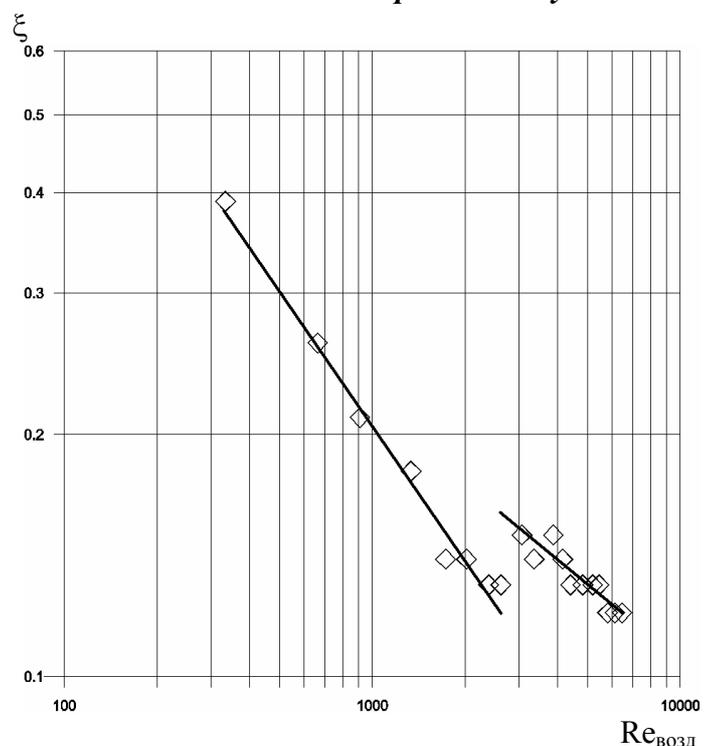


Рис. 3. Зависимость коэффициента сопротивления от числа Рейнольдса.

Экспериментально определенный коэффициент сопротивления представляется формулами:

$$\xi = \frac{8,7}{Re_{\text{возд}}^{0,54}} \text{ при } Re_{\text{возд}} < 2600; \quad (2)$$

$$\xi = \frac{1,7}{Re_{\text{возд}}^{0,3}} \text{ при } Re_{\text{возд}} > 2600. \quad (3)$$

Аэродинамическое сопротивление сухого одиночного щелевого канала в безразмерном виде можно определить по таким зависимостям:

$$Eu = 280 \cdot Re_{\text{возд}}^{-0,54} \text{ при } Re_{\text{возд}} < 2600; \quad (4)$$

$$Eu = 280 \cdot Re_{\text{возд}}^{-0,3} \text{ при } Re_{\text{возд}} > 2600. \quad (5)$$

Следующий этап исследований посвящен определению гидродинамического сопротивления орошаемой плоскопараллельной насадки. Опыты проводились с поочередным изменением расходов воздуха и воды.

На рис. 4 показана зависимость удельного сопротивления ППН от скорости потока воздуха для одиночного щелевого канала при различных плотностях орошения.

Функциональные зависимости $\Delta P/H = f(\varpi_{\text{возд}})$ орошаемой насадки имеют вид кривых с ярко выраженным разрывом, который наблюдается при скорости движения воздуха $\varpi_{\text{возд}} \approx 5$ м/с ($Re_{\text{возд}} = 2600$). В области ламинарного режима течения воздуха при исследуемых плотностях орошения сопротивление сухой насадки выше сопротивления орошаемой насадки. Это объясняется тем, что наличие жидкой фазы уменьшает шероховатость, вызванную наличием ячеек сеточки.

При переходе в область турбулентного режима течения воздуха возникает барботаж жидкой фазы на поверхности сетки.

Это подтверждается наблюдаемым расслоением зависимости $\Delta P/H = f(\varpi_{\text{возд}})$.

Из рис. 5 видно, что при ламинарном течении воздуха зависимости $\Delta P/H = f(\Gamma)$ имеют ярко выраженный линейный характер, при этом удельное сопротивление потока воздуха не зависит от плотности орошения Γ .

При переходе течения воздуха в турбулентный режим характер зависимости $\Delta P/H = f(\Gamma)$ изменяется. При определенных Γ зависимость $\Delta P/H = f(\Gamma)$ претерпевает излом. Это свидетельствует о том, что на этих скоростях движения воздуха появля-

$$\frac{\Delta P}{H}$$

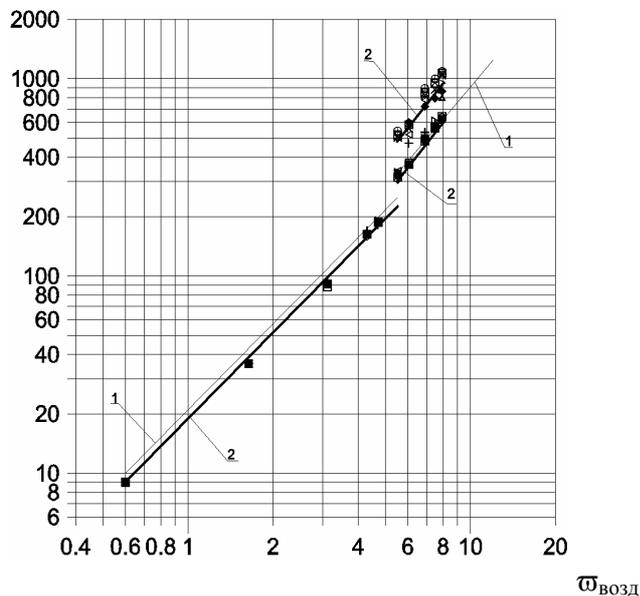


Рис. 4. Зависимость аэродинамического сопротивления одиночного щелевого канала плоскопараллельной насадки от скорости воздуха при различных плотностях орошения: 1 - сухая насадка; 2 - орошаемая насадка.

$$\frac{\Delta P}{H}$$

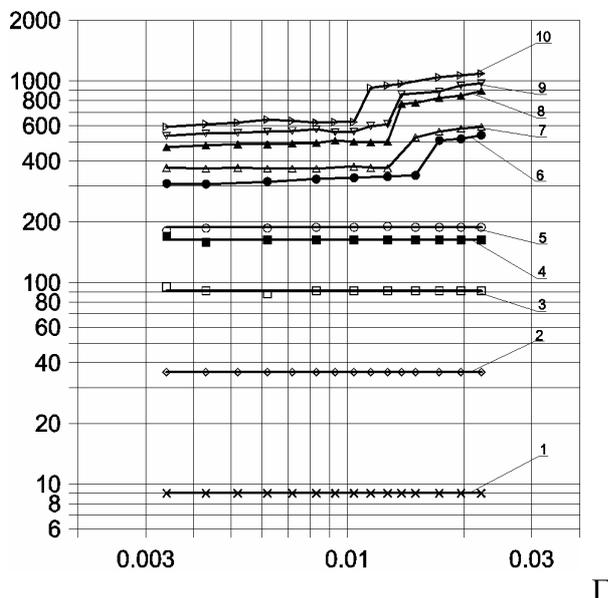


Рис. 5. Зависимость удельного гидродинамического сопротивления одиночного щелевого канала плоскопараллельной насадки от плотности орошения Γ при различных скоростях воздушного потока $\varpi_{\text{возд}}$, рассчитанного по свободному сечению канала. Скорости воздуха: 1 - $\varpi_{\text{возд}} = 0,6$ м/с; 2 - 1,64; 3 - 3,12; 4 - 4,3; 5 - 4,71; 6 - 5,52; 7 - 6,05; 8 - 6,89; 9 - 7,49; 10 - 7,93.

ется барботаж жидкости. При этом, чем выше скорость течения воздуха, тем меньше плотность орошения при которой наступает этот излом и соответственно начало барботажа.

Критериальные зависимости характеризующие изменение коэффициента сопротивления записывается формулами:

$$\xi = \frac{7,9}{Re_{\text{возд}}^{0,54}} \text{ при } Re_{\text{возд}} < 2600; \quad (6)$$

$$\xi = \frac{0,5}{Re_{\text{возд}}^{0,15}} \text{ при } Re_{\text{возд}} > 2600 \text{ без барботажа}; \quad (7)$$

$$\xi = \frac{0,05}{Re_{\text{возд}}^{0,17}} \text{ при } Re_{\text{возд}} > 2600 \text{ с барботажем}. \quad (8)$$

Гидродинамическое сопротивление орошаемого одиночного щелевого канала в безразмерном виде можно определить по таким зависимостям:

$$Eu = 248 \cdot Re_{\text{возд}}^{-0,54} \text{ при } Re_{\text{возд}} < 2600; \quad (9)$$

$$Eu = 15,3 \cdot Re_{\text{возд}}^{-0,15} \text{ при } Re_{\text{возд}} > 2600 \text{ без барботажа}; \quad (10)$$

$$Eu = 14 \cdot Re_{\text{возд}}^{-0,17} \cdot Re_{\text{ж}}^{0,19} \text{ при } Re_{\text{возд}} > 2600 \text{ с барботажем}. \quad (11)$$

На рис. 6 в логарифмических системах координат показана зависимость критической скорости газового потока от плотности орошения. Как видно из рисунка, с увеличением плотности орошения критическая скорость, характеризующая явление захлебывания исследуемого участка, уменьшается.

Обобщение опытных данных по критическим скоростям исследуемой насадки на основании литературных данных проведено в виде системы критериев: $K = f(Fr, We, Ga)$. В процессе исследования последние два критерия не изменялись, поэтому при обработке данных методом наименьших квадратов получено критериальное уравнение.

$$K = 0,038 \cdot Fr^{-0,81} \quad (12)$$

Уравнение справедливо в диапазоне $Fr = 0,1 \dots 0,28$.

Выводы

В результате проведенных исследований установлено, что экранирование водяной пленки на элементах плоскопараллельной насадки позволяет повысить скорость движения воздуха следовательно интенсифицировать процессы тепло- и массообмена.

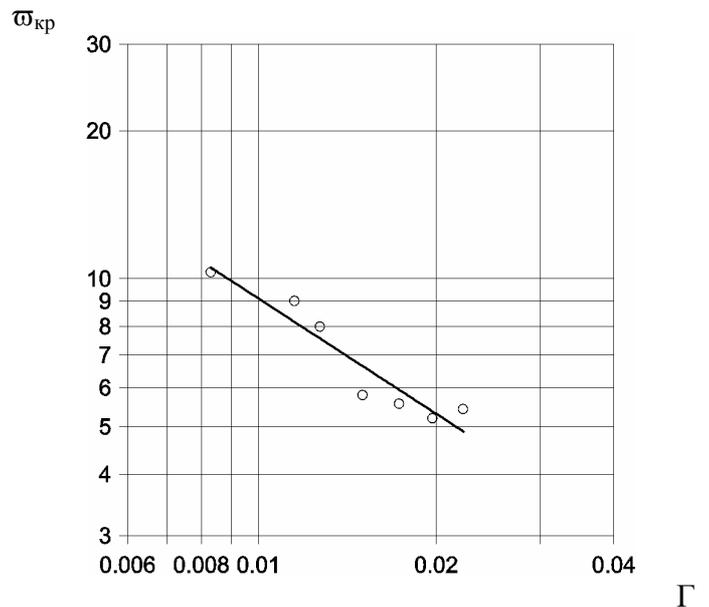


Рис. 6. Зависимость критической скорости газового потока от плотности орошения.

Для расчета аэродинамического сопротивления одиночного щелевого канала сухой плоскопараллельной насадки с экранированной водяной пленкой можно использовать обобщенные зависимости (1)–(5).

Для расчета гидродинамического сопротивления одиночного щелевого канала плоскопараллельной насадки при противоточном движении жидкости и восходящего потока воздуха можно использовать обобщенные зависимости (6)–(11).

Для определения верхней границы работы тепломассообменного аппарата с плоскопараллельной насадкой, ограниченной явлением захлебывания, можно использовать обобщенную зависимость (12).

ЛИТЕРАТУРА

1. Дикий Н.А., Шовкалюк Ю.В. Исследование гидродинамики плоскопараллельной насадки // Технічна електродинаміка. - 2004. - № 3. - С. 91-93.
2. Безродный М.К., Пиоро И.Л., Костюк Т.О. Процессы переноса в двухфазных термосифонных системах. - К.: Факт, 2003. - 480 с: ил.
3. Хоблер Т. Массопередача и абсорбция. - Л.: Химия, 1964. - 480 с.
4. Берман Л.Д. Испарительное охлаждение циркуляционной воды. - М.: Госэнергоиздат, 1957. - 317 с.

Получено 29.09.2004 г.