

стей ребер. С боковых же поверхностей ребер и с межреберной поверхности стенки, которые находятся в зоне циркуляционного движения теплоносителя, уровень теплоотдачи - значительно ниже. Таким образом, интенсивность теплоотдачи уменьшается в направлении от торцовых поверхностей к основаниям ребер. Уровень теплоотдачи возрастает при увеличении толщины ребра и уменьшении шага оребрения, но слабо зависит от

высоты ребра. Поэтому, для интенсификации теплообмена за счет оребрения не обязательно использовать высокие ребра.

ЛИТЕРАТУРА

1. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости.- М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.

Получено 18.10.2004 г.

УДК 532.695

ДАВЫДЕНКО Д.Б.

Ин-т технической теплофизики НАН Украины

ТРАЕКТОРИИ ДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ В ДВУХФАЗНОМ ПОТОКЕ ЖИДКОСТИ, ОБРАБАТЫВАЕМОЙ В РПА

З використанням результатів чисельного моделювання течії однофазного середовища у робочих елементах циліндричного роторно-пульсаційного апарату (РПА) отримано наближене чисельне рішення задачі Лагранжа про рух одиничних часток дисперсної складової двофазного потоку. Розраховані швидкості та траєкторії часток в залежності від їх початкового положення в вхідному перерізі каналу внутрішнього статора РПА. Аналіз отриманих результатів дозволив оцінити можливість подрібнення дисперсних часток в потоці.

С использованием результатов численного моделирования течения однофазной среды в рабочих элементах цилиндрического роторно-пульсационного аппарата (РПА) получено приближенное численное решение задачи Лагранжа о движении одиночных частиц дисперсной составляющей двухфазного потока. Рассчитаны скорости и траектории частиц в зависимости от их исходного расположения во входном сечении канала внутреннего статора РПА. Анализ полученных результатов позволил судить о возможности дробления дисперсных частиц в потоке.

The approximate solution of Lagrangian problem of single particles motion of disperse component of two phase flow in the executive elements of cylindrical rotor-pulsating device (RPD) using results of modeling of single-phase agent fluent is received. The particles velocities and the trajectories are calculated depending on their initial positions in the entrance section of RPD inner stator channel. Received results analysis allows to predetermine the possibility of disperse particles splitting in the flow.

A - площадь лобового сечения частицы, m^2 ;

B - объем частицы, m^3 ;

c - коэффициент гидродинамического сопротивления;

d - диаметр сферической частицы, m ;

p - давление, Pa ;

r - радиальная координата, m ;

u - радиальная составляющая скорости, m/s ;

w - скорость в неподвижной системе отсчета, m/s ;

θ - угловая координата;

μ - динамический коэффициент вязкости, $Pa \cdot s$;

ρ - плотность, kg/m^3 ;

τ - время, s ;

ω - угловая скорость, $1/s$;

РПА - роторно-пульсационный аппарат;

Верхний индекс :

k - номер шага по времени.

Нижние индексы:

d - дисперсная среда;

c - непрерывная (несущая) среда;

0 - параметры во входном сечении канала внутреннего статора,

r - ротор;

r, R - направление вдоль радиуса.

Введение

Важнейшими показателями работы роторно-пульсационных аппаратов, предназначенных для создания однородных мелкодисперсных эмульсий из механической смеси взаимно нерастворимых жидкостей, являются размер дисперсных частиц в готовом продукте и время, необходимое для получения в аппарате эмульсии требуемого качества. Определение этих показателей расчетным путем является весьма сложной задачей. Для этого, строго говоря, необходимо задать начальную форму и расположение дисперсных включений в несущую (непрерывную) жидкую среду, численно решать систему уравнений движения вязкой жидкости для разнородных сред, используя при этом условия равенства скоростей, касательных и нормальных напряжений (с учетом поверхностного натяжения) на границах раздела фаз. При этом необходимо следить за движением границ диспергированного вещества вплоть до момента их предполагаемых разрывов. Такая задача оказывается весьма сложной даже для одной единственной частицы диспергированного вещества. Кроме значительных трудностей вычислительного характера при данном подходе возникают также проблемы, связанные с размером ячеек разностной сетки, применяемой для численного решения задачи. Ячейки могут оказаться такого же порядка, что и размер дисперсных частиц. В этом случае решение поставленной задачи, в принципе, оказывается невозможным.

Более осуществимым является приближенный подход к решению задачи о двухфазных течениях, основанный на решении задачи Лагранжа о движении отдельно взятой частицы. Считается, что поле скоростей несущей (непрерывной) среды известно, а отдельные дисперсные включения движутся относительно этой несущей среды. По величинам чисел подобия, рассчитанных, исходя из значений относительных скоростей или ускорений частиц, судят о стабильности формы частицы или о вероятности ее разрушения под действием динамических воздействий со стороны несущего потока. Приближенность такого подхода очевидна, поскольку поле скоростей у потоков вязкой жидкости должно быть непрерывным. Тем не менее, данный идеализированный подход, который основан на ряде экспериментальных зависимо-

стей, оказывается весьма удобным и часто используемым. Он, в частности, широко используется при решении задачи о распылении жидкого топлива в потоке газообразного окислителя. В работе [1] данный подход применялся для моделирования и анализа процессов деформирования и дробления капель при их движении в вязкой среде.

Постановка задачи и метод решения

В данной работе на основе решения задачи Лагранжа о движении одиночной частицы в потоке жидкости, проходящем через рабочие элементы РПА, строятся траектории частиц диспергированного вещества и оценивается возможность их дробления при определенном режиме работы аппарата. Нестационарные поля скоростей и давлений однофазного потока несущей среды были найдены методом численного моделирования, изложенным в [2]. Там же рассматриваются конструктивные особенности рабочих элементов РПА и используемая расчетная область для решения задачи о течении жидкости.

Рассматривается двумерный поток в плоском горизонтальном сечении рабочего пространства аппарата, перпендикулярном к оси вращения ротора. Поля скоростей и давлений несущего потока периодически изменяются во времени и в пространстве. Периодом в пространстве считается область, заключенная между двумя радиальными сечениями, проходящими через середины стенок соседних каналов статоров. Периодом во времени будет интервал между двумя последовательными совмещениями каналов ротора с каналами статоров. Расчет поля скоростей выполнен, исходя из предположения, что частицы диспергированного вещества не оказывают на это поле заметного влияния.

Уравнение сохранения импульса частицы относительно неподвижной системы отсчета имеет вид:

$$B_d \rho_d \frac{d\vec{w}_d}{d\tau} = -0,5c_d \rho_c A_d \left| \vec{w}_d - \vec{w}_c \right| \cdot (\vec{w}_d - \vec{w}_c) - B_d \cdot \vec{grad}(p) - 0,5\rho_c B_d \frac{d(\vec{w}_d - \vec{w}_c)}{d\tau}. \quad (1)$$

Если форма частицы близка к сферической, можно принять

$$V_d = \pi \cdot d_d^3 / 6, \quad A_d = \pi \cdot d_d^2 / 4.$$

Слагаемые, стоящие в правой части уравнения сохранения, отражают действие на частицу силы гидродинамического сопротивления со стороны несущей среды, силы давления и силы, связанной с эффектом присоединенной массы [3]. Действие силы тяжести в уравнении не отражено, т.к. задача рассматривается в плоскости, к которой вектор силы тяжести перпендикулярен. Следует также отметить, что как выражение для силы сопротивления, так и выражение для силы, связанной с эффектом присоединенной массы, содержат разности скоростей частицы и несущего потока в данной точке пространства. Поэтому, удобнее рассматривать это уравнение в системе отсчета, связанной с движущейся несущей средой. Кроме того, уравнение, записанное в векторной форме, удобно переписать в проекциях на оси координат и обезразмерить. Поскольку расчет полей скоростей и давлений для несущего потока, изложенный в [2], проводится в полярной системе координат, ось которой совпадает с осью вращения ротора, уравнение (1) для одиночной частицы также целесообразно представить в этой системе. Таким образом, после процедуры обезразмеривания и ряда преобразований уравнение сохранения импульса в проекциях на радиальную и тангенциальную оси координат приобретет вид:

$$\frac{dU_R}{dT} = -\eta_d \frac{dU_{c,R}}{dT} - \frac{3}{4D_d} \eta_c c_d \cdot |U| \cdot U_R - \eta_c \frac{\partial P}{\partial R}; \quad (2)$$

$$\frac{d\Omega}{dT} = -\eta_d \frac{d\Omega_c}{dT} - \frac{3}{4D_d} \eta_c c_d \cdot |U| \cdot \Omega - \frac{\eta_c}{R^2} \frac{\partial P}{\partial \theta}; \quad (3)$$

где

$$|U| = \sqrt{U_R^2 + (\Omega R)^2}; \quad U_R = (u_{d,r} - u_{c,r}) / U_\infty;$$

$$U_{c,R} = u_{c,r} / U_\infty; \quad U_\infty = \omega_p r_o; \quad \Omega = (\omega_d - \omega_c) / \omega_p;$$

$$\Omega_c = \omega_c / \omega_p; \quad D_d = d_d / r_o; \quad R = r / r_o;$$

$$P = (p - p_o) / (\rho_c U_\infty^2); \quad T = \tau U_\infty / r_o;$$

$$\eta_d = \rho_d / (\rho_d + 0,5 \rho_c);$$

$$\eta_c = \rho_c / (\rho_d + 0,5 \rho_c).$$

Коэффициент гидродинамического сопротивления движению жидкой сферической частицы в вязкой несущей среде при малых и умеренных числах Рейнольдса можно рассчитать по формуле, приведенной в [1]:

$$c_d = \left(\frac{24}{\text{Re}} + \frac{3,3}{\text{Re}^{0,5}} + 0,48 \right) \cdot \frac{1 + 2/3 \cdot \sigma}{1 + \sigma}, \quad (4)$$

$$\text{где } \text{Re} = \frac{\omega_p r_o^2 \rho_c}{\mu_c} |U| \cdot D_d; \quad \sigma = \mu_c / \mu_d.$$

Систему уравнений (2), (3) совместно с известными полями скоростей и давлений однородного потока несущей среды можно использовать для построения траекторий частиц диспергированной жидкости при прохождении смеси через рабочие элементы РПА и оценки значений чисел подобия, характеризующих стабильность формы частиц. Кроме геометрии рабочих элементов РПА, режима работы аппарата и свойств несущей среды считаются известными также физические свойства диспергированного вещества и исходный диаметр его частиц. Задаются также исходные значения полярных координат $R_{d,0}$, $\theta_{d,0}$ сферической частицы диспергированного вещества во входном сечении канала внутреннего статора аппарата. Начальные значения относительных скоростей Ω и U_R принимаются равными нулю.

Система уравнений (2), (3) после линеаризации решается численно по неявной схеме Эйлера.

- Схема решения выглядит следующим образом:
- путем анализа полей скоростей и давлений в несущем потоке с использованием процедуры интерполяции определяются значения величин $\frac{dU_{c,R}}{dT}$; $\frac{\partial P}{\partial R}$; $\frac{d\Omega_c}{dT}$; $\frac{\partial P}{\partial \theta}$,
 - соответствующие требуемому моменту времени и координатам частицы;
 - по текущим значениям Ω^k и U_R^k определяется величина произведения $(|U| \cdot c_d)_k$, входящего в уравнения (2) и (3);
 - составляются разностные аналоги дифференциальных уравнений (2) и (3) по неявной схеме Эйлера, которые решаются относительно неизвестных величин Ω^{k+1} и U_R^{k+1} для следующего шага по времени;
 - определяются координаты частицы в момент времени $k + 1$ из выражений:

$$R_{d,k+1} = R_{d,k} + [(U_R^{k+1} + U_R^k)/2 + U_{c,R}^{k+1/2}] \times \Delta T;$$

$$\theta_{d,k+1} = \theta_{d,k} + [(\Omega^{k+1} + \Omega^k)/2 + \Omega_c^{k+1/2}] \times \Delta T.$$

Безразмерный шаг по времени ΔT в последних выражениях принимается таким же по величине, как и в задаче [2] о течении несущей среды.

Следует отметить, что представленная расчетная схема не учитывает, в отличие от работы [1], изменение формы частицы в процессе ее движения. Ее форма в любой момент времени предполагается сферической. Это, естественно, приводит к некоторым неточностям в определении величин A_d , B_d и c_d для движущейся частицы.

Обсуждение результатов

По рассмотренной схеме были найдены скорости и координаты частиц в различные моменты времени в зависимости от их исходного положения. В исходном положении частица находится в одной из точек входного сечения канала внутреннего статора ($R_{d,0} = 1$). Траектории частиц в рабо-

чем пространстве РПА для четырех случаев исходного положения частицы представлены на рис. 1 (а, б, в, г).

в зависимости от их исходного положения.

Частица, попадая в канал ротора, совершает вместе с ним круговые движения вокруг оси его вращения. Поэтому, траектория частицы в канале ротора для наглядности строится относительно вращающегося ротора. Таким образом, удастся совместить на одном рисунке траектории и в статоре и в роторе. Цифрами 1, 2 и 3 на рисунках обозначены внутренний статор, ротор и внешний статор соответственно. Положение ротора на рисунке показано условно. Рассмотрен случай течения несущей среды со свойствами $\mu_c = 0,001$ Па·с; $\rho_c = 1000$ кг/м³ (вода) при нулевом перепаде давления между входным и выходным сечениями рабочего пространства аппарата. В качестве дис-

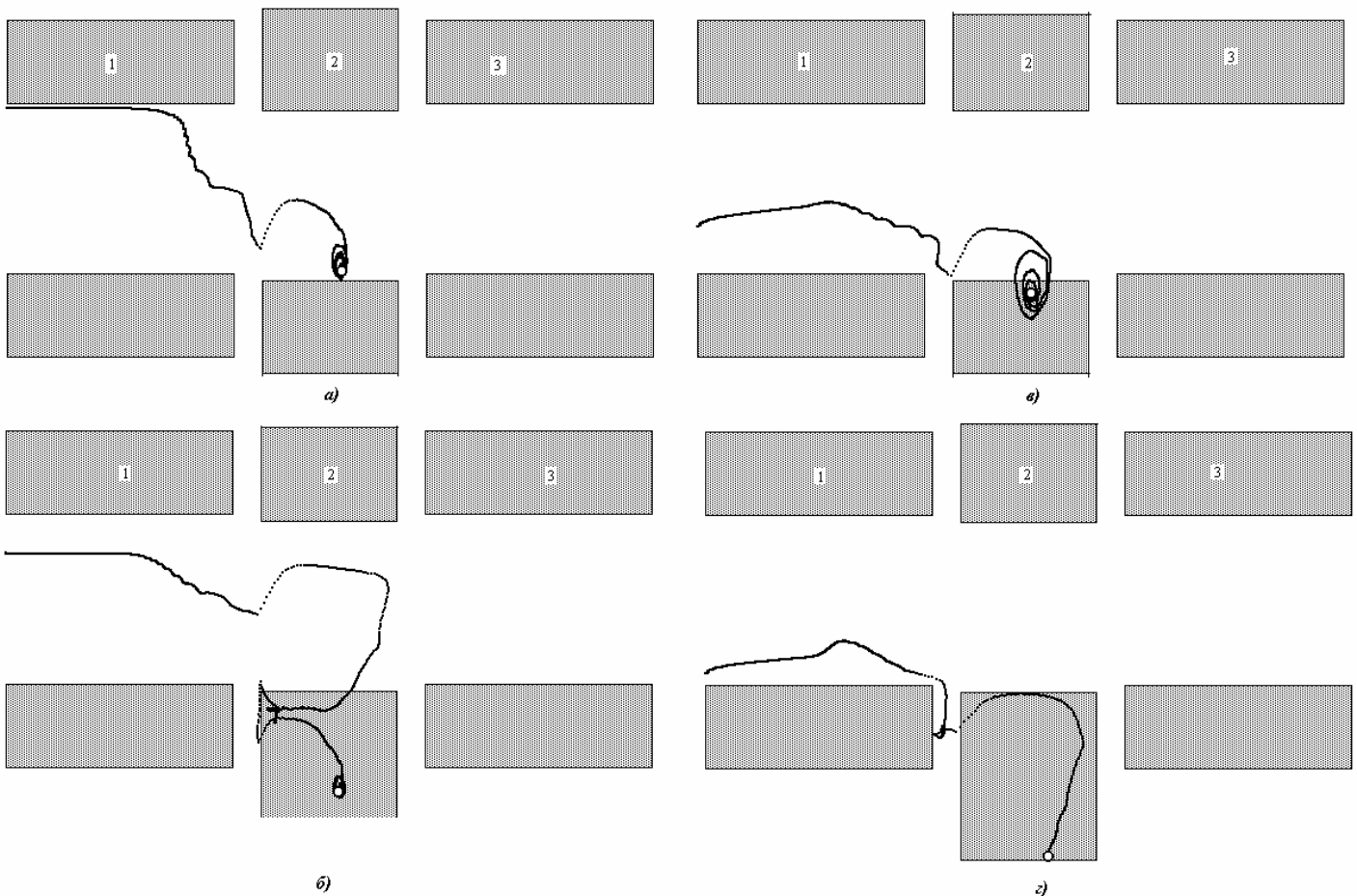


Рис. 1. Траектории дисперсных частиц в двухфазном потоке жидкости, обрабатываемой в РПА.

перной составляющей рассматривается растительное масло ($\mu_d = 0,06$ Па·с; $\rho_d = 880$ кг/м³, $d_d = 0,22 \cdot 10^{-3}$ м). Коэффициент поверхностного натяжения на границе раздела сред “вода – растительное масло” составляет $\sigma = 0,01$ Н/м.

Как видно из рисунков, траектория частицы существенно зависит от ее начального положения во входном сечении канала внутреннего статора. Общим для характера движения частиц является то, что частицы почти в каждом из рассмотренных случаев попадают в вихревую область, располагающуюся в канале ротора, и пребывают в этой области достаточно длительное время, двигаясь по спиралевидным траекториям.

Об устойчивости частиц по отношению к внешним динамическим нагрузкам со стороны несущего потока судят обычно по значениям чисел Вебера (We) или Бонда (Bo). Большинство полуэмпирических теорий разрушения жидких частиц основывается на том, что капля будет иметь стабильную форму при условии

$$We = \rho_c d_d |U|^2 / \sigma < 10 \dots 12.$$

Если число We превышает указанные значения, то силы поверхностного натяжения не будут уравновешивать внешние динамические нагрузки,

действующие на частицу, и частица будет деформироваться до тех пор, пока ее оболочка не разрушится. Однако, этот процесс происходит не мгновенно, а по истечении определенного времени, в течении которого число We будет превышать указанное критическое значение. Необходимое для разрушения частиц время определяется экспериментальным путем. Оно будет тем меньше, чем выше значение We для данной частицы. В связи с отсутствием в литературе надежных экспериментальных данных, относящихся к закономерностям дробления жидких частиц в рабочих элементах РПА, будем условно считать, что частица разрушается в случае, если неравенство $We > 12$ выполняется в течении промежутка времени, соответствующего временному периоду задачи [2] для течения несущей среды. По истечении данного промежутка времени решение задачи движения частицы исходного размера прерывается. Моменту разрушения частицы соответствует конечная точка траекторий, представленных на рис. 1

Траектории частиц существенно зависят от их размера. На рис. 2 представлены результаты расчета траекторий для двух частиц, находящихся в начальный момент времени по середине канала

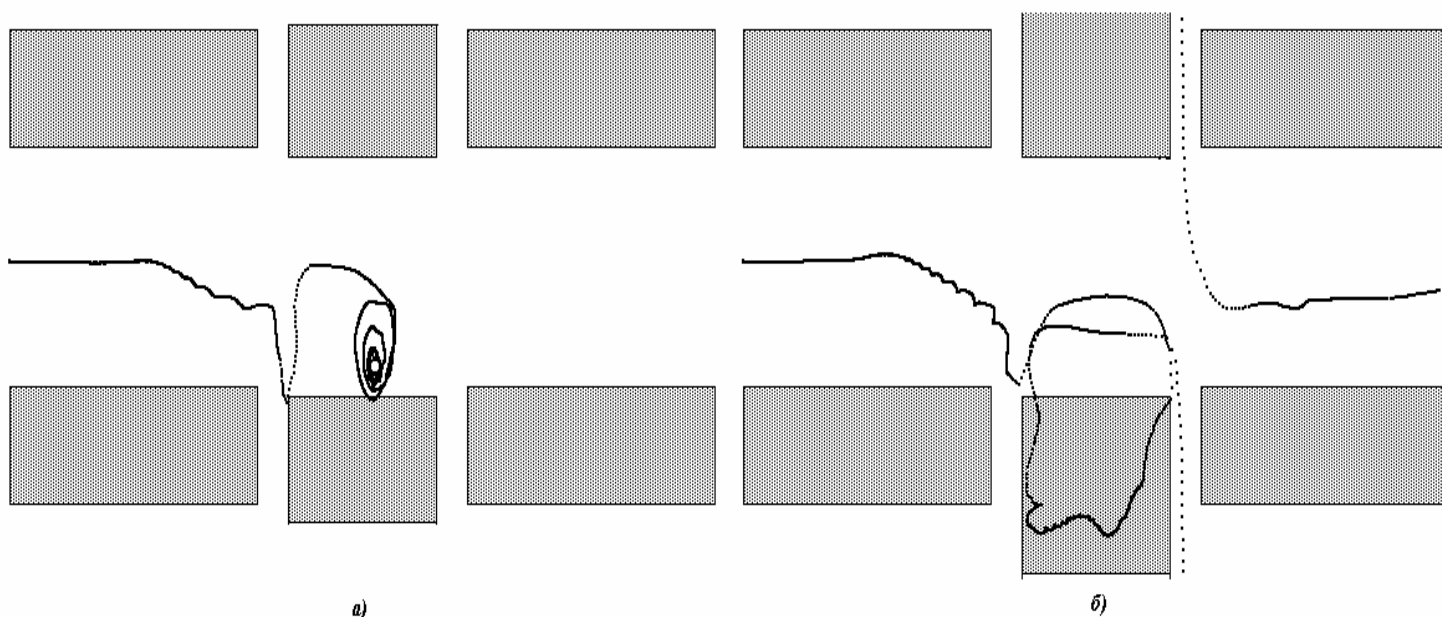


Рис. 2. Траектории дисперсных частиц в зависимости от их диаметров:

а) $d_d = 0,22 \cdot 10^{-3}$ м; б) $d_d = 0,22 \cdot 10^{-4}$ м.

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.