

DOI

УДК 66.021:001.891.573

К РАСЧЕТУ ЖИДКОСТНЫХ ТАРЕЛЬЧАТЫХ СЕПАРАТОРОВ С ПАРАБОЛИЧЕСКИМИ ВСТАВКАМИ

Р. И. Ибятв, Б. Г. Зиганшин, Д. М. Галеев

Реферат. Объектом исследований является жидкостные тарельчатые сепараторы с криволинейными вставками, которые описываются уравнением вида $z = aR^m$. Исследование проводили с целью изучения влияния формы вставок на интенсивность воздействия центробежной силы жидкостному потоку, а также на величину пути осаждения (или всплытия) частиц дисперсной среды. Эффективность осветления дисперсных сред предопределяется двумя конструктивными характеристиками аппарата – длиной пути осаждения частицы и направлением действия центробежной силы относительно стенок криволинейного канала. Для параболических вставок расстояние между ними и угол наклона стенок являются переменными величинами. Для вычисления этих величин построены нелинейные уравнения и предложен алгоритм численных расчетов. Результаты расчетов представлены в виде графических зависимостей названных параметров по длине канала. Расчеты проводились для параболоидов вращения со степенями $m=2, 3$ и 4 при значениях коэффициента $a=2, 3$ и 4 . При увеличении значения коэффициента a расстояние между вставками уменьшается. Влияние показателя степени m на величину зазора между параболоидами вращения имеет более сложный характер. Размер зазора по длине канала уменьшался от 3 см до нескольких миллиметров. Угол наклона стенок относительно оси вращения уменьшался в диапазоне от 70 до 10 градусов. При увеличении параметров a и m данный угол уменьшается, следовательно, компонента центробежной силы, направленной перпендикулярно к стенке канала, возрастает. Уравнения движения жидкостной системы решены методом поверхностей равных расходов, согласно которого поток представляется в виде нескольких слоев со своими скоростями. На входном участке эпюра скоростей развивается от плоского профиля до параболического вида. В результате действия центробежной силы наблюдается асимметрия профиля скорости. Полученные результаты могут быть использованы при обосновании геометрических характеристик тарельчатого сепаратора с параболическими вставками и согласовывать их с режимными параметрами потока.

Ключевые слова: жидкостные сепараторы, параболические вставки, геометрические параметры, поле скоростей.

Введение. Разделение жидкостных дисперсных сред производится с помощью различных аппаратов [1], таких как центрифуги [2], гидроциклоны [3, 4], сепараторы [5, 6, 7]. Целью разделения неоднородных сред могут являться как осветление жидкостей [1, 4], так и выделение твердой фазы в виде конечного продукта [7]. Для интенсификации процесса разделения тонкодисперсных сред широко применяются тарельчатые сепараторы. В тарельчатых сепараторах пакет соосно расположенных тарелок разделяет жидкостную систему на тонкие слои, что обеспечивает уменьшения пути осаждения дисперсных частиц. В настоящее время в основном используются сепараторы с коническими тарелками [5, 6, 8]. В то же время существуют сепараторы с тарелками другой геометрической формой, работа которых остается малоизученной [9]. В данной работе рассматривается работа жидкостных сепараторов с криволинейными вставками параболического вида. В сепараторах с криволинейными вставками, в отличие от сепараторов с коническими вставками, расстояние между ними является переменной величиной. При этом, вследствие уменьшения расстояния между ними, сокращается путь осаждения дисперсных частиц. Кроме того, криволинейная геометрическая форма канала позволяет увеличивать интенсивность воздействия центробежной силы на жидкостный поток. Следовательно, жидкостные сепараторы с криволинейными вставками могут быть

использованы для ускорения процесса разделения [9].

Гидродинамическая картина течения среды определяется после вычисления геометрических параметров рабочей зоны. Поэтому, в каждом шаге численного решения уравнений движения, приходится вычислять значений текущего расстояния между тарелками, угла наклона касательной линии к образующей и радиуса вращения. В связи с этим, при расчете движения дисперсной среды в криволинейных каналах возникают дополнительные трудности [9, 10, 11]. Соответствующая математическая модель течения дисперсных сред остается малоизученным. Таким образом, расчет геометрических характеристик криволинейных зазоров между тарелками, а также математическое моделирование течений дисперсных сред в этих каналах, являются актуальными задачами.

Цель исследований – изучение влияния формы вставок на интенсивность воздействия центробежной силы жидкостному потоку, а также на величину пути осаждения (или всплытия) частиц дисперсной среды.

Условия, материал и методы. Рассмотрим криволинейный зазор, образованный двумя параболоидами вращения, которые заданы уравнениями

$$z = aR^m, \quad (1)$$

$$z = aR^m + b, \quad (2)$$

Здесь параметры a, b, m являются заданными постоянными числами, причем $b=OO_1$ (рис. 1). Пусть продольная координата x совпадает с образующей верхнего параболоида вращения, а координата R – величина, определяющая расстояния его произвольно точки от оси вращения. Как видно из рисунка, координата x показывает длину дуги OA . При заданном радиусе R длина дуги x вычисляется по формуле

$$x = \int_0^R \sqrt{1 + (dz/dR)^2} dR.$$

Тогда для произвольной точки x верхней вставки (1), радиус вращения вычисляется с

помощью нелинейного уравнения

$$\int_0^R \sqrt{1 + a^2 n^2 R^{2n-2}} dR - x = 0. \quad (3)$$

Определенный интеграл, входящий в состав данного уравнения, в квадратурах вычисляется только для значений параметра m , равных 1 и 2. В частности, при $m=2$ уравнение (3) примет вид

$$\frac{R}{2} \sqrt{1 + 4a^2 R^2} + \frac{1}{4a} \ln \left(R + \frac{\sqrt{1 + 4a^2 R^2}}{2a} \right) + \frac{1}{4a} \ln(2a) - x = 0.$$

В остальных случаях, для определения радиуса вращения R , уравнение (3) решается численно.

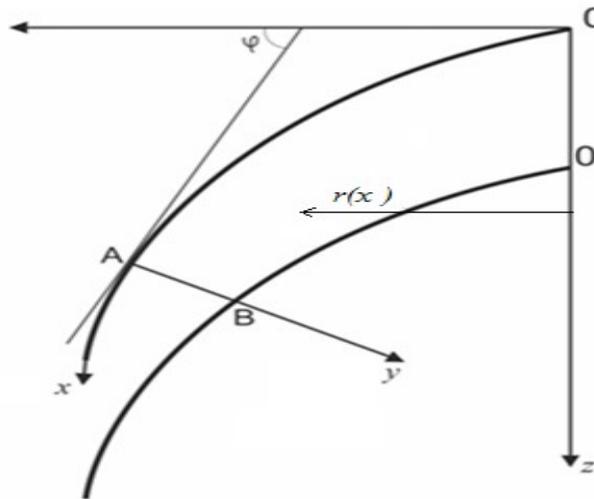


Рис. 1 – К расчету толщины зазора между параболическими тарелками: x – продольная координата; y – поперечная координата; φ – угол наклона касательной к образующей параболоида вращения; r – радиус вращения; A – произвольная точка; B – точка, соответствующая минимальному расстоянию до противоположной стенки в сечении $x = x_A$

Толщину зазора между тарелками определим как кратчайшее расстояние от точки x_A до нижней тарелки. Она представляется как расстояние между точками $A(R_A, z_A)$ и $B(R_B, z)$:

$$d(R_B) = \sqrt{(R_B - R_A)^2 + (aR_B^m + b - aR_A^m)^2}. \quad (4)$$

Для определения координаты точки $B(R_B, z)$ потребуем выполнения условия минимума данной функции в виде равенства нулю первой производной. После несложных преобразований получим следующее нелинейное уравнение

$$ma^2 R_B^{2m-1} + ma(b - aR_A^m)R_B^{m-1} + R_B - R_A = 0. \quad (5)$$

Итак, алгоритм численного расчета зазора между соосными параболоидами вращения будет следующим:

1. В верхнем параболоиде вращения выбирается произвольная точка x_A .
2. Для выбранной точки по уравнению (3) вычисляется радиус вращения R_A .
3. Из уравнения (5) определяется радиус вращения R_B , который соответствует

минимальному зазору между вставками в сечении $x = x_A$.

4. По найденным радиусам с помощью формулы (4) вычисляется искомое расстояние между параболическими тарелками.

В частном случае, когда $m=1$, уравнение (5) можно привести к виду

$$R_A - R_B = \frac{ab}{a^2 + 1}. \quad (6)$$

С другой стороны, для прямого кругового конуса имеет место соотношение $z = tg\varphi R$, следовательно, в этом случае параметр a определяется как $a = tg\varphi$. Здесь φ – угол наклона касательной к образующей параболоида вращения в текущей точке x . Тогда, для вставок конической формы, формула (6) приводится к виду

$$R_B = R_A - b \sin \varphi \cos \varphi.$$

При этом, поскольку для конических вставок имеет место зависимость $d = b \cos \varphi$, последняя формула примет вид $R_B = R_A - d \sin \varphi$. Она, в свою очередь, является предельным случаем зависимости, которая позволяет

вычислить значения текущего радиуса в рабочей зоне между вставками

$$r = R - y \sin \varphi \quad (7)$$

Кроме того отметим, что при $m=1$ значение параметра $a=1$ соответствует углу наклона конической вставки, равному $\varphi = 45^\circ$.

Алгоритм численного решения нелинейных уравнений (3) и (5) представлен в виде блок-схемы (рис. 2). В блок-схеме через функцию $fA(x, R)$ обозначено уравнение (3), через $fB(x, R)$ - уравнение (5). При численной реализации алгоритма решения названных уравнений необходимо учесть следующие ограничения. Для уравнения (3) ищется первый положительный корень, а для уравнения (5) отыскивается корень, который является ближайшим к значению R_A и удовлетворяет условию $R_B < R_A$.

Эффективность освещения дисперсных сред в жидкостных тарельчатых сепараторах в

основном определяется двумя конструктивными характеристиками аппарата. Во-первых, это - длина пути осаждения частицы к поверхности вставки. Длина пути осаждения зависит от расстояния между вставками и угла наклона стенок криволинейного канала от оси вращения. Во-вторых, важную роль играют величина центробежной силы и ее направление действия относительно стенок криволинейного канала. Интенсивность центробежной силы зависит от величины текущего радиуса и скорости вращения вставок, а ее направление определяется углом между нормалью к поверхности тарелки и вектора действия центробежной силы. Не трудно показать, что названный угол вычисляется через значения угла наклона касательной к образующей параболоида по формуле.

$$\beta = \pi / 2 - \varphi$$

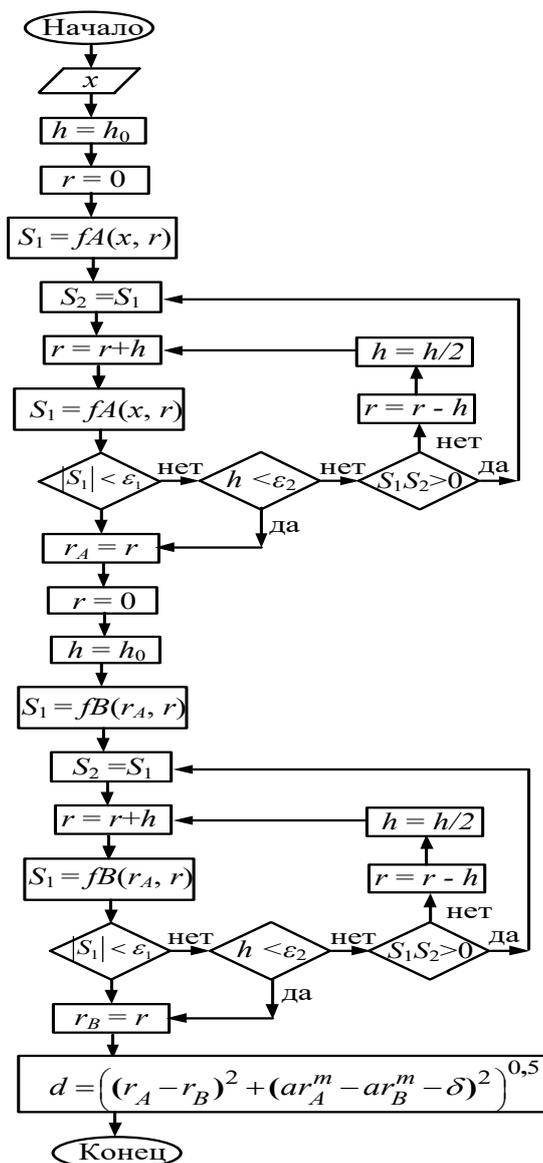


Рис. 2 – Блок-схема численного расчета расстояния между параболоидами вращения

В криволинейных каналах угол наклона является переменной величиной. Для его определения запишем уравнения параболоидов вращения через тригонометрические функции

$$\sin \varphi = \frac{dz}{dR} \cdot \left(1 + \left(\frac{dz}{dR} \right)^2 \right)^{-1/2}, \quad \cos \varphi = \left(1 + \left(\frac{dz}{dR} \right)^2 \right)^{-1/2}.$$

С учетом зависимости $\beta = \pi / 2 - \varphi$, они примут вид

$$\sin \beta = \left(1 + m^2 a^2 R^{2m-2} \right)^{-1/2}, \quad \cos \beta = \frac{dz}{dR} \cdot \left(1 + m^2 a^2 R^{2m-2} \right)^{-1/2}.$$

Следовательно, $\beta = \arcsin \left(\left(1 + a^2 n^2 r^{2n-2} \right)^{-1/2} \right)$.

Далее рассмотрим движение дисперсной среды по направлению от периферии тарелок к центру аппарата, которое происходит под действием перепада давления. Уравнения сохранения массы и импульсов дисперсной среды для осесимметричного течения, в квазигомогенном приближении, можно записать в виде [12, 13]

$$\frac{\partial(rU)}{\partial x} + \frac{\partial(rV)}{\partial y} = 0, \quad (8)$$

$$\rho \left(U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} \right) = - \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial y} \left(r \mu \frac{\partial U}{\partial y} \right) + \rho F_x, \quad (9)$$

$$- \frac{\partial P}{\partial y} + \rho F_y = 0. \quad (10)$$

Система уравнений (8)-(10) должна решаться при следующих граничных условиях

$$y = \delta(x): \quad U = U_\delta;$$

$$y = d: \quad U = 0.$$

Здесь $\delta(x)$ - толщина слоя осадка, U_δ - скорость скольжения слоя осадка под действием центробежной силы по направлению к периферии тарелки. На входе задается средняя скорость в виде плоского профиля, которая определяет расход на один криволинейный канал между вставками.

Уравнения (8)-(10) были решены методом поверхностей равных расходов, согласно которого поток представляется в виде нескольких слоев y_k , через которые протекает определенное количество жидкостной среды

$$q_k = \int_{y_{k-1}}^{y_k} 2\pi r U dy, \quad k = \overline{1, N+1}.$$

Продифференцируем данную зависимость, предварительно представляя интеграл в виде формулы трапеции численного интегрирования. Тогда с учетом условия постоянства величины q_k получим [13, 14]

$$\frac{dy_k}{dx} = \frac{dy_{k-1}}{dx} - \frac{y_k - y_{k-1}}{r_{k-1}U_{k-1} + r_kU_k} \cdot \frac{d(r_{k-1}U_{k-1} + r_kU_k)}{dx}, \quad k = \overline{1, N+1}. \quad (11)$$

В уравнении движения (9) выразим частные производные $\partial U / \partial x$ и $\partial P / \partial x$ через полные дифференциалы

$$\frac{\partial U}{\partial x} = \frac{dU}{dx} - \frac{\partial U}{\partial y}, \quad \frac{\partial P}{\partial x} = \frac{dP}{dx} - \frac{\partial P}{\partial y}.$$

Кроме того, примем во внимание, что на поверхностях равных расходов имеют место зависимости

$$V_k - U_k \frac{H_2 dy_k}{H_1 dx_1} = 0, \quad k = \overline{1, N}.$$

Тогда уравнение (9), записанное на введенных поверхностях с учетом (10), представляется в виде следующей системы обыкновенных дифференциальных уравнений [13, 14]

$$\rho U_k \frac{dU_k}{dx} = - \frac{dP}{dx} + \rho F_{y_k} \frac{dy_k}{dx} + \frac{\mu}{r_k} \frac{\partial}{\partial y} \left(r \frac{\partial U}{\partial y} \right)_k + \rho F_{x_k}, \quad k = \overline{1, N}. \quad (12)$$

Система обыкновенных дифференциальных уравнений (11)-(12) позволяет определить положения линий поверхностей равных расходов и поле скоростей на них. Эти уравнения могут быть решены одним из известных численных методов. При проведении расчетов, на каждом шаге численного интегрирования уравнения (12), предварительно вычисляются частные производные по координате y . Для их вычисления, сеточные решения, полученные на предыдущем шаге, представляется в виде разложения в ряд по полной системе базисных функций, удовлетворяющих граничным условиям

$$U = \sum_{j=1}^N A_j(x) \Psi_{kj}(x, y_k). \quad (13)$$

Коэффициенты разложения $A_j(x)$ находятся из условий совпадения скоростей, определяемых из (13), со значениями $U_k(x)$ на линиях $y_k(x)$.

Результаты и обсуждение. На основе построенной математической модели был проведен вычислительный эксперимент. Некоторые результаты численных расчетов геометрических характеристик сепаратора приведены на рисунках 3-6. На величину зазора между соосными параболоидами вращения влияют значения всех параметров a , b и m , которые использованы в уравнениях (1)-(2). Влияние коэффициента a на расстояния между параболоидами вращения второго порядка представлено на рис. 3. Расчеты показывают, что при увеличении значения коэффициента a расстояние между вставками уменьшается. На рисунке 4 представлены кривые, которые демонстрируют изменения расстояния между вставками при разных значениях показателя степени параболоидов вращения. Как видим, закономерность влияния параметра m на величину зазора между вставками имеет двоякий характер. На начальном участке канала, где радиус вращения имеет небольшие значения, при увеличении m расстояние между вставками возрастает. А дальше, при значительных размерах радиуса, увеличение показателя степени параболоидов приводит к уменьшению поперечного размера криволинейного канала.

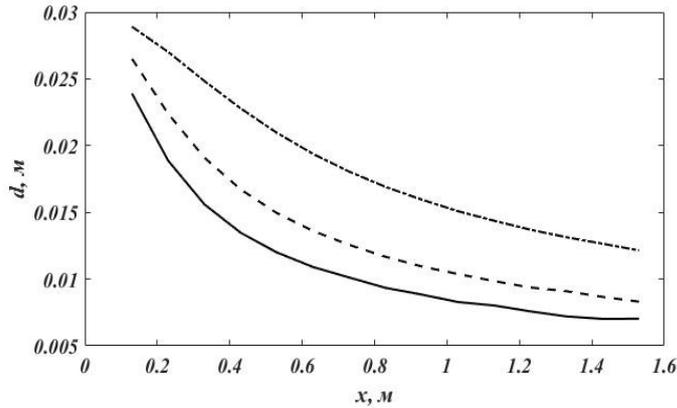


Рис. 3 – Изменение расстояния между параболоидами вращения при значениях $b=0.03$ м, $m=2$: $a=2$ – штрихпунктирная линия, $a=3$ – разрывная линия, $a=4$ – сплошная линия.

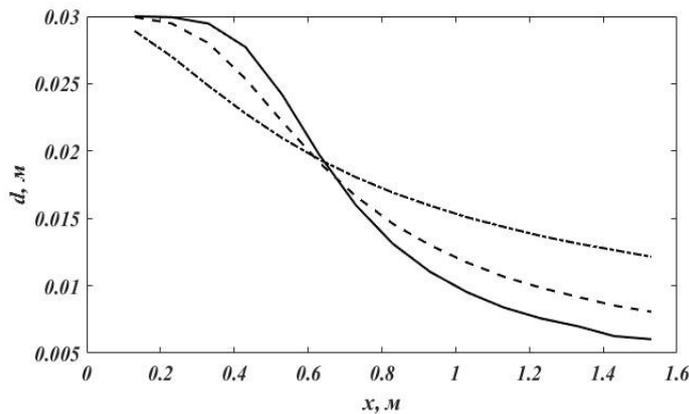


Рис. 4 – Изменение расстояния между параболоидами вращения при значениях $b=0.03$ м, $a=2$: $m=2$ – штрихпунктирная линия, $m=3$ – разрывная линия, $m=4$ – сплошная линия.

Изменение угла между направлениями центробежной силы и нормали к поверхности вставки при разных значениях коэффициента a и показателя степени m приведены на рисунках 5 и 6. Как видим, при увеличении этих параметров угол $\beta = \pi / 2 - \varphi$ уменьшается. Причем, характер изменения угла является более монотонным по сравнению с изменением поперечного размера канала. При изменении значения угла β меняется характер распределения центробежной силы по направлениям осей координат. Компоненты вектора

центробежного ускорения по направлениям осей x и y имеют вид [13]

$$F_x = \omega^2 r \sin \beta \quad F_y = -\omega^2 r \cos \beta.$$

Откуда видно, что при уменьшении угла β , компонента вектора ускорения F_x , направленная вдоль криволинейного канала, уменьшается. Компонента вектора F_y , которая направлена перпендикулярно к стенке канала, возрастает. Следовательно, скорости осаждения или всплытия дисперсных частиц будут расти.

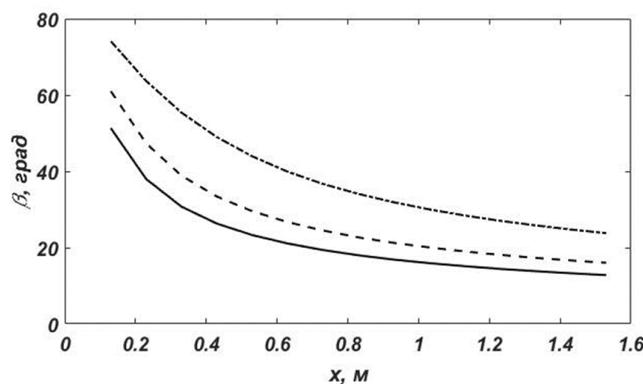


Рис. 5 – Изменение угла между направлениями центробежной силы и нормали к поверхности вставки при значениях $b=0.03$ м, $m=2$: $a=2$ – штрихпунктирная линия, $a=3$ – разрывная линия, $a=4$ – сплошная линия.

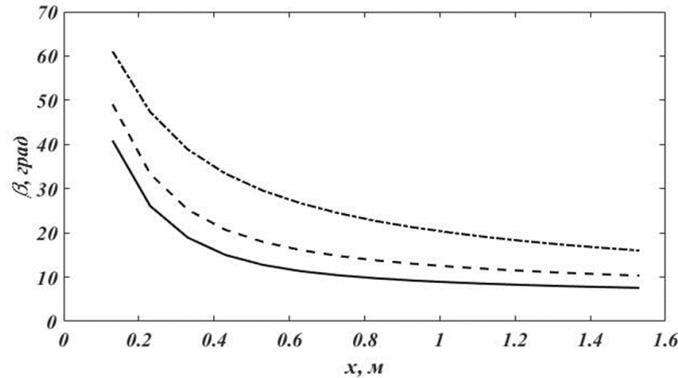


Рис. 6 – Изменение угла между направлениями центробежной силы и нормали к поверхности вставки при значениях $b=0.03$ м, $a=2$: $m=2$ – штрихпунктирная линия, $m=3$ – разрывная линия, $m=4$ – сплошная линия.

Системы обыкновенных дифференциальных уравнений (11)-(12) была решена после перехода к безразмерным величинам

$$\tilde{x} = x/(h_* Re), l = y/h_*, u = U/U_*, \tilde{P} = P/(\rho U_*^2),$$

где $Re = h_* U_* \rho / \mu$, $Fr = U_*^2 / (h_*^2 \omega^2)$; U_* , h_* – характерные значения скорости течения и размера канала. В результате решений определены положения линии $y_k(x)$ и значения скоростей $U_k(x)$ на них. Скорости движения среды на линиях различались между собой, что наглядно показывало ее распределение в потоке и ее зависимость от формы вставки. На входном участке течения происходит развитие

начального плоского профиля до параболического вида (рис. 7). На форму эпюры скоростей существенно влияет скорость вращения. Поскольку центробежная сила действует против направления течения, скорость потока у верхней стенки замедляется. Поэтому на рисунках наблюдается значительная асимметричность профиля скорости.

Построенные уравнения и алгоритмы их численного решения [15, 16, 17] позволяют обосновать значения геометрических характеристик тарельчатого сепаратора с параболическими вставками и согласовывать их с режимными параметрами потока.

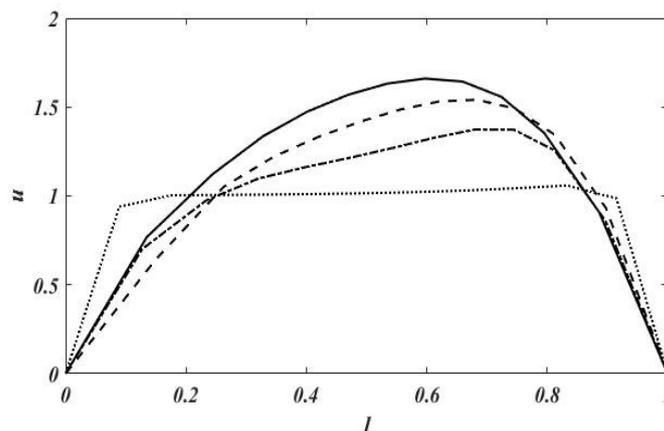


Рис. 7 – Эпюра скоростей при $Re=100$, $Fr=1$, $a=2$, $m=2$ на сечениях по продольной координате: $x=0,199$ – пунктирная линия, $x=0,19$ – штрихпунктирная линия, $x=0,18$ – разрывная линия, $x=0,17$ – сплошная линия: u – безразмерная продольная скорость; l – безразмерная поперечная координата

Выводы. Форма вставок сильно влияет на интенсивность воздействия центробежной силы жидкостному потоку, а также на величину пути осаждения (или всплытия) частиц дисперсной среды. При увеличении значений коэффициента a с 2 до 4 и показателя степени m с 2 до 4 угол наклона стенок относительно оси вращения уменьшается от 70° до 10° . Следовательно, скорости осаждения или всплытия дисперсных частиц будут расти. Величина зазора

между параболическими вставками также уменьшается. При изменении параметров a и m в вышеуказанном диапазоне расстояние между вставками уменьшается от 3 см до нескольких миллиметров, следовательно, уменьшается путь осаждения (или всплытия) частиц. На входном участке эпюра скоростей развивается от плоского профиля до параболического вида. В результате действия центробежной силы наблюдается асимметрия профиля скорости.

Литература

1. Шкоропад Д.Е., Новиков О.П. Центрифуги и сепараторы для химических производств. М.: Химия, 1987. 256 с.
2. Измерение скорости седиментации мелкодисперсных частиц в тарельчатой центрифуге / И.Г. Дик, Д.Ю. Килимник, Л.Л. Миньков и др. // Инженерно-физический журнал. 2003. Т.76. № 4. С. 7-17.
3. Laptev A.G., Basharov M.M., Lapteva E.A. Turbulent drift of finely dispersed particles in emulsions and suspensions in pressure hydrocyclones // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2020. Vol. 93. № 4. P. 790-795.
4. Старостин А.Г., Федотова О.А., Кобелева А.Р. Очистка сточных вод от мелкодисперсных частиц на гидроциклоне // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология. 2020. № 1. С. 99-112.
5. Жуков В.Г., Чесноков В.М. Давление в тонкослойном потоке жидкости тарельчатого центробежного сепаратора // Теоретические основы химической технологии. 2016. Т. 50. № 6. С.683-693.
6. О кинетике потока жидкости в центробежном сепараторе / А.А. Славянский, Е.В. Семенов, В.А. Грибова и др. // Хранение и переработка сельхозсырья. 2020. № 4. С. 166-176.
7. Федотов К.В., Сенченко А.Е. Моделирование движения двухфазного потока пульпы в центробежном сепараторе // Экология и промышленность России. 2017. Т. 21. № 11. С. 30-35.
8. Математическое моделирование процесса сепарирования полидисперсных систем / А.Н. Саламатин, И.И. Поникаров, О.А. Перельгин и др. // Теоретические основы химической технологии. 2002. Т. 36. № 5. С. 529-532.
9. Семенов Е.В., Славянский А.А., Лебедева Н.Н. Особенности процесса центробежного разделения жидкостной системы в сепараторе со вставками двойной кривизны // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2019. № 3. С. 3-7.
10. Математическое моделирование течения двухфазных сред в рабочих узлах аппаратов сложной геометрической формы / Р.И. Ибяттов, Ф.Г. Ахмадиев, Р.А. Галимов и др. // Вестник Технологического университета. 2023. Т. 26. № 4. С. 71-75.
11. Компьютерное моделирование течения неньютоновских двухфазных сред в областях сложной геометрии / Р.И. Ибяттов, Ф.Г. Ахмадиев, Р.А. Галимов и др. // Вестник Технологического университета. 2023. Т. 26. № 11. С. 193-199.
12. Debuchy R., Dument A., Muhe H., et al. Radial inflow between a rotating and a stationary disc // European Journal of Mechanics. – B. Fluids. 1998. Vol. 17, issue 6. P. 791-810. Doi.org/10.1016/S0997-7546(99)80014-4.
13. Kholpanov L.P., Ibyatov R.I. Simulation of the hydrodynamics of multiphase heterogeneous media in a centrifugal field // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2009. Vol. 43. No. 5, pp. 629-641. doi: 10.1134/S0040579509050054.
14. Ibyatov R. I., Akhmadiev F. G. Computer Simulation of the Flow of Two-Phase Media in Channels and Pipes of Complex Geometric Shape // Lobachevskii journal of mathematics, 2023, Vol. 44, No. 5, pp. 1679-1685. – doi: 10.1134/S199508022305027X.
15. Ибяттов Р.И., Зиганшин Б.Г. О моделировании случайных процессов в агропромышленном комплексе // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2022. Т. 17, № 1(65). С. 50-55.
16. Математическая модель задачи о замене оборудования / В.В. Королева, Е.Г. Филиппов, В.В. Ячменева и др. // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2022. Т. 17, № 3(67). С. 90-95.
17. Энергетическая математическая модель опрыскивателя / К. А. Хафизов, А. А. Нурмиев, Р. Н. Хафизов и др. // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2023. Т. 18, № 2(70). С. 117-126.

Сведения об авторах:

Ибяттов Равиль Ибрагимович – доктор технических наук, заведующий кафедрой физики и математики, e-mail: r.ibyatov@mail.ru

Зиганшин Булат Гусманович – доктор технических наук, профессор РАН, профессор кафедры машин и оборудования в агробизнесе, e-mail: zigan66@mail.ru

Галеев Дамир Миннурович – аспирант, ассистент кафедры физики и математики, e-mail: damirgaleev97@mail.ru

Казанский государственный аграрный университет, г. Казань, Россия

TO THE CALCULATION OF LIQUID DISC SEPARATORS WITH PARABOLIC INSERTS

R. I. Ibyatov, B. G. Ziganshin, D. M. Galeev

Abstract. The object of the study is liquid disk separators with curvilinear inserts, which are described by equations of the type $z = aR^m$. The study was conducted to study the effect of the insert shape on the intensity of the centrifugal force on the liquid flow, as well as on the length of the sedimentation path (or float) of dispersed medium particles. The efficiency of clarification of dispersed media is predetermined by two design characteristics of the device - the length of the particle sedimentation path and the direction of the centrifugal force relative to the walls of the curved channel. For parabolic inserts, the distance between them and the angle of inclination of the walls are variable quantities. To calculate these quantities, nonlinear equations are constructed and an algorithm for numerical calculations is proposed. The calculation results are presented as graphical dependencies of the above parameters along the channel length. The calculations were performed for paraboloids of revolution with degrees $m=2, 3$ and 4 at coefficient $a=2, 3$ and 4 . As the coefficient a increases, the distance between the inserts decreases. The influence of the exponent m on the gap between the paraboloids of revolution is more complex. The gap size along the channel length decreased from 3 cm to several millimeters. The angle of inclination of the walls relative to the rotation axis decreased in the range from 70 to 10 degrees. As the parameters a and m increase, this angle decreases, therefore, the component of the centrifugal force directed perpendicular to the channel wall increases. The equations of motion of the liquid system were solved by the method of equal flow surfaces, according to which the flow is represented as several layers with their own velocities. At the inlet section, the velocity diagram develops from a flat profile to a parabolic form. As a result of the action of the centrifugal force, an asymmetry of the velocity profile is observed. The obtained results can be used to justify the geometric characteristics of a plate separator with parabolic

inserts and to coordinate them with the flow regime parameters.

Key words: liquid separators, parabolic inserts, geometric parameters, velocity field.

References

1. Shkoropad DE, Novikov OP. Tsentrifugi i separatory dlya khimicheskikh proizvodstv. [Centrifuges and separators for chemical production]. Moscow: Khimiya. 1987; 256 p.
2. Dik IG, Kilimnik DYu, Minkov LL. [Measuring the sedimentation rate of fine particles in a disc centrifuge]. Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal. 2003; Vol.76. 4. 7-17 p.
3. Laptev AG, Basharov MM, Lapteva EA. Turbulent drift of finely dispersed particles in emulsions and suspensions in pressure hydrocyclones. Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2020; Vol.93. 4. 790-795 p.
4. Starostin AG, Fedotova OA, Kobeleva AR. [Wastewater treatment from fine particles in a hydrocyclone]. Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Khimicheskaya tekhnologiya i biotekhnologiya. 2020; 1. 99-112 p.
5. Zhukov VG, Chesnokov VM. [Pressure in a thin-layer liquid flow of a disc centrifugal separator]. Teoreticheskie osnovy khimicheskoy tekhnologii. 2016; Vol.50. 6. 683-693 p.
6. Slavyanskiy AA, Semenov EV, Gribkova VA. [On the kinetics of liquid flow in a centrifugal separator]. Khranenie i pererabotka selkhozsyrya. 2020; 4. 166-176 p.
7. Fedotov KV, Senchenko AE. [Modeling the motion of a two-phase pulp flow in a centrifugal separator]. Ekologiya i promyshlennost Rossii. 2017; Vol.21. 11. 30-35 p.
8. Salamatin AN, Ponikarov II, Perelygin OA. [Mathematical modeling of the separation process of polydisperse systems of devices with complex geometric shapes]. Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta. 2023; Vol.26. 4. 71-75 p.
9. Semenov EV, Slavyanskiy AA, Lebedeva NN. [Features of the centrifugal separation process of a liquid system in a separator with double-curvature inserts]. Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie. 2019; 3. 3-7 p.
10. Ibyatov RI, Akhmadiev FG, Galimov RA. [Mathematical modeling of the flow of two-phase media in the working units of devices with complex geometric shapes]. Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta. 2023; Vol.26. 4. 71-75 p.
11. Ibyatov RI, Akhmadiev FG, Galimov RA. [Computer modeling of the flow of non-Newtonian two-phase media in areas of complex geometry]. Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta. 2023; Vol.26. 11. 193-199 p.
12. Debuchy R, Dument A, Muhe H. Radial inflow between a rotating and a stationary disc. European Journal of Mechanics. B. Fluids. 1998; Vol.17. issue 6. 791-810 p. Doi.org/10.1016/S0997-7546(99)80014-4.
13. Kholpanov LP, Ibyatov RI. Simulation of the hydrodynamics of multiphase heterogeneous media in a centrifugal field. Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2009; Vol.43. 5, pp. 629-641 p. doi: 10.1134/S0040579509050054.
14. Ibyatov RI, Akhmadiev FG. Computer simulation of the flow of two-phase media in channels and pipes of complex geometric shape. Lobachevskiy journal of mathematics. 2023; Vol.44. 5. 1679-1685 p. – doi: 10.1134/S199508022305027X.
15. Ibyatov RI, Ziganshin BG. [On modeling random processes in the agro-industrial complex]. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2022; Vol. 17/ 1(65). 50-55 p.
16. Koroleva VV, Filippov EG, Yachmeneva VV. [Mathematical model of the problem of equipment replacement]. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2022; Vol. 17. 3(67). 90-95 p.
17. Khafizov KA, Nurmiev AA, Khafizov RN. [Energy mathematical model of a sprayer]. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2023; Vol. 18. 2(70). 117-126 p.

Authors:

Ibyatov Ravil Ibragimovich – Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Physics and Mathematics, e-mail: r.ibyatov@mail.ru

Ziganshin Bulat Gusmanovich – Doctor of Technical sciences, professor of the Russian Academy of Sciences, professor of Machines and Equipment in Agribusiness Department, e-mail: zigan66@mail.ru

Galeev Damir Minnurovich – graduate student, Assistant of the Department of Physics and Mathematics, e-mail: damirgaleev97@mail.ru

Kazan State Agrarian University, Kazan, Russia.