

А. А. Салин, Н. С. Гришин, С. И. Поникаров

ОСОБЕННОСТИ ДВИЖЕНИЯ РАДИАЛЬНЫХ ПОТОКОВ В ЦЕНТРОБЕЖНЫХ ЭКСТРАКТОРАХ БЕЗНАПОРНОГО ТИПА

Ключевые слова: центробежный экстрактор, радиальные двухфазные потоки, угол раствора насадка.

Определена зависимость между векторами скорости отдельных элементарных объемов жидкости в центробежных аппаратах безнапорного типа. Рассмотрено уравнение неразрывности применительно к описанию однонаправленного радиального движения жидкости в центробежном экстракторе. Используя аналогию с насадками для гравитационного поля, рассмотрены особенности движения потоков в плоскоцилиндрическом роторе с различными видами насадок, работающих в поле действия центробежных сил.

Keywords: centrifugal extractor, radial two-phase flows, the opening angle of the nozzle.

The relationship between the velocity vectors of individual elementary volumes of fluid in free-flow centrifugal machines was determined. An continuity equation was discussed with regard to the unidirectional radial flow description in a centrifugal extractor. The features of liquid flows in the plano-cylinder rotor with different types of nozzles, working in the field of centrifugal forces were considered, using the analogy with nozzles for the gravitational field.

Центробежные аппараты являются более эффективным оборудованием для проведения процессов жидкостной экстракции, чем аппараты гравитационного типа, поскольку ускорение генерируемого в них центробежного поля в несколько раз превышает ускорение свободных частиц.

Центробежные силы, необходимые для развития большой поверхности межфазного взаимодействия и механического разделения потоков могут генерироваться не только путем подвода дополнительной внешней механической энергии, но и за счет особенностей движения самих взаимодействующих потоков [1, 2].

Для установления зависимости между векторами скорости отдельных элементарных объемов потока жидкости в центробежных аппаратах безнапорного типа можно использовать цилиндрическую систему координат. Выделим внутри потока жидкости в роторе элементарный объем, ограниченный тремя парами смежных координатных поверхностей (рис. 1).

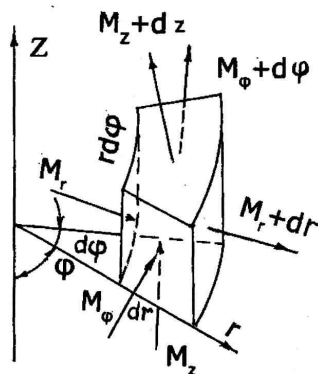


Рис. 1 - Изменение массы элементарного объема жидкости в цилиндрической системе координат

Примем, что составляющие скорости потока вдоль осей координат - V_r , V_ϕ , V_z , а плотность движущейся жидкости - ρ . Тогда через грань

$[r \cdot d\phi \cdot dz]$ выделенного участка за единицу времени τ вдоль оси r войдет масса жидкости, равная M_r :

$$M_r = \rho \cdot V_r \cdot r \cdot d\phi \cdot dz \cdot d\tau. \quad (1)$$

На противоположной грани выделенного объема скорость и плотность жидкости изменятся, и будут соответственно равны $V_r + \frac{\partial V_r}{\partial r} \cdot dr$ и

$\rho + \frac{\partial \rho}{\partial r} \cdot dr$. Тогда через эту грань $[(r+dr) \cdot d\phi \cdot dz]$ за то же время $d\tau$ выйдет масса жидкости равная M_{r+dr} :

$$M_{r+dr} = \left(\rho \cdot V_r + \frac{\partial(\rho \cdot V_r)}{\partial r} \cdot dr \right) \cdot (r+dr) \cdot d\phi \cdot dz \cdot d\tau. \quad (2)$$

Пренебрегая членом высшего порядка малости, приращение массы в элементарном объеме вдоль оси r составит:

$$dM_r = M_r - M_{r+dr} = - \left(\frac{\rho \cdot V_r}{r} + \frac{\partial(\rho \cdot V_r)}{\partial r} \right) \cdot dr \cdot r \cdot d\phi \cdot dz \cdot d\tau. \quad (3)$$

По аналогии находим приращение массы в выделенном объеме вдоль осей ϕ и z :

$$dM_\phi = - \frac{\partial(\rho \cdot V_\phi)}{\partial \phi} \cdot d\phi \cdot dr \cdot dz \cdot d\tau; \quad (4)$$

$$dM_z = - \frac{\partial(\rho \cdot V_z)}{\partial z} \cdot dz \cdot r \cdot d\phi \cdot dr \cdot d\tau. \quad (5)$$

Полное приращение массы в элементарном объеме за время $d\tau$ будет равно сумме найденных приращений:

$$dM = \left(\frac{\rho \cdot V_r}{r} + \frac{\partial(\rho \cdot V_r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial(\rho \cdot V_\phi)}{\partial \phi} + \frac{\partial(\rho \cdot V_z)}{\partial z} \right) \cdot r \cdot d\phi \cdot dz \cdot dr \cdot d\tau. \quad (6)$$

Известно, что изменение массы в полностью заполненном жидкостью объеме возможно лишь вследствие изменения плотности жидкости в этом объеме. Это изменение можно представить в следующей форме:

$$dm = \left(\rho + \frac{\partial \rho}{\partial t} \right) \cdot r \cdot d\varphi \cdot dz \cdot dt \cdot dr - \rho \cdot r \cdot d\varphi \cdot dz \cdot dt \cdot dr = \frac{\partial \rho}{\partial t} \cdot r \cdot d\varphi \cdot dz \cdot dt \cdot dr \quad (7)$$

Для установившегося движения $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$, масса элементарного объема жидкости не изменяется, следовательно:

$$\frac{\rho \cdot V_r}{r} + \frac{\partial(\rho \cdot V_r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial(\rho \cdot V_\varphi)}{\partial \varphi} + \frac{\partial(\rho \cdot V_z)}{\partial z} = 0 \quad (8)$$

Для капельных жидкостей, которые практически несжимаемы ($\rho = \text{const}$) уравнение неразрывности можно записать в виде:

$$\frac{V_r}{r} + \frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial(V_\varphi)}{\partial \varphi} + \frac{\partial(V_z)}{\partial z} = 0 \quad (9)$$

Рассмотрим уравнение сплошности для однонаправленного радиального движения жидкости (вдоль оси r) в центробежном экстракторе (рис. 2).

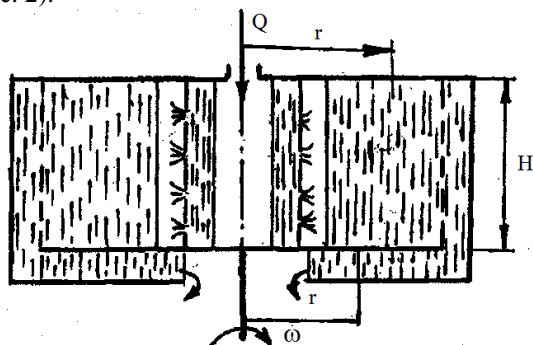


Рис. 2 - Схема движения жидкости в роторе центробежного экстрактора

Принимаем, что жидкость, при радиальном движении, в роторе центробежного экстрактора равномерно распределяется по его высоте. Поскольку в данном случае отсутствуют осевая и тангенциальная составляющие скорости, то уравнение неразрывности записывается в следующем виде:

$$\frac{V_r}{r} + \frac{dV_r}{dr} = 0 \quad (10)$$

Разделив переменные и интегрируя, получим: $\ln V_r + \ln r + C_1 = 0$, откуда $V_r \cdot r = C_2$.

Из рисунка видно, что $(V_r)_{r=R} = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot H} = \frac{C_2}{R}$,

следовательно $C_2 = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot H}$. Полученное уравнение

показывает, что при установившемся движении жидкости в центробежных экстракторах, несмотря на изменение средних скоростей и площадей живых сечений по длине потока, расход в нем остается постоянным.

Движение потоков в плоскоцилиндрическом роторе центробежного аппарата (рис. 3) можно рассматривать аналогично движению потоков в диффузоре гравитационного насадка [3-

5], который имеет относительно большие гидравлические потери (в среднем коэффициенты $\mu_c = \mu = 0,45$ и $\xi = 4$).

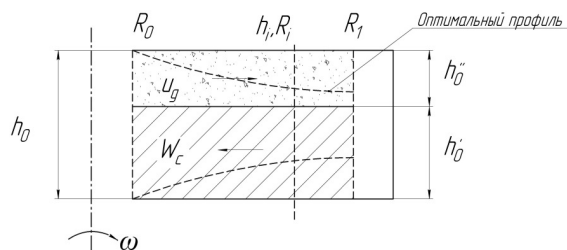


Рис. 3 - Движение радиальных потоков в центробежном экстракторе

Рассмотрим несколько случаев движения потоков в плоскоцилиндрическом роторе с различными видами насадок, работающих в условиях наложения на поток поля центробежных сил, интенсивность воздействия которого переменна по радиусу. Различного вида насадки можно получить, изменяя угол раствора α_1 от 0° до 180° : от расширяющегося типа при $\alpha_1 = 0^\circ$, когда проходное сечение насадка растёт с увеличением радиуса и до случая истечения жидкостей в осевом направлении через плоскую цилиндрическую щель (при $\alpha_1 = 90^\circ$).

Форма плоскоцилиндрического ротора центробежного аппарата для радиально-направленных потоков представляет собой, с одной стороны, расширяющуюся насадку для потока, направленного от центра к периферии, а с другой - сужающуюся насадку для потока, направленного от периферии к центру, то есть имеет различные гидравлические характеристики для тяжелой и легкой фазы. При этом наименьшее проходное сечение насадка приходится на наименьшие центробежные силы давления.

Принимая во внимание особенности течения радиальных потоков в центробежном аппарате, проведем исследование зависимости формы насадка от структуры потоков в радиальном направлении. Учитывая, что радиальным потокам также присущи гидродинамические и гидравлические закономерности гравитационных колонных аппаратов (поскольку ротор, как правило, снабжается радиальными перегородками), то влиянием сил Кориолиса можно пренебречь. Используя аналогию с оптимальными насадками для гравитационного поля (сходящаяся насадка, сопло Лавая), определим рациональный угол раствора элементов для центробежного аппарата, разложив его на три составляющих угла наклона насадка:

$$\alpha = \alpha' + \alpha'' + \alpha''' \quad (11)$$

где α' - конический сходящийся насадок для гравитационного поля; α'' - цилиндрический насадок для центробежного поля, обеспечивающий равенство сечений канала для плоскоцилиндрического ротора; α''' - угол, обеспечивающий соответствие профиля потока в насадке (сопле).

Для гравитационного поля установлено [6, 7], что наиболее благоприятным для

гидродинамического режима истечения жидкостей является конический сходящийся насадок с углом конусности $\alpha' = 13^\circ$, коэффициент скорости у которого равен 0,97, а коэффициент расхода 0,95.

Однако оптимальный угол раствора для гравитационного насадка (конфузора) не будет соответствовать радиальному потоку в насадке центробежного экстрактора. Это объясняется тем, что наличие центростремительного ускорения с увеличением радиуса способствует росту скорости потока, тогда, согласно условию неразрывности потока сечение его с изменением радиуса будет также меняться. Следовательно, оптимальный угол будет несколько отличаться от значения величины 13° в зависимости от числа оборотов ротора и скоростей фаз.

Для определения второй составляющей угла раствора α'' , будем исходить из условия равенства сечений потока в плоскостях R_0 и R_1 (рис. 3).

Согласно данному условию, принимаем:

$$2 \cdot \pi \cdot R_0 \cdot h_0 = 2 \cdot \pi \cdot R_1 \cdot h_1, \quad (12)$$

откуда

$$h_0 = h_1 \cdot \left(\frac{R_1}{R_0} \right); \quad (13)$$

или

$$\operatorname{tg} \alpha_1'' = \frac{(h_0 - h_1)}{2 \cdot (R_1 - R_0)}. \quad (14)$$

Подставляя значение h_0 , из уравнения (3), получим:

$$\operatorname{tg} \alpha_1'' = \frac{\left(\frac{R_1 \cdot h_1''}{R_0} - h_1'' \right)}{2 \cdot (R_1 - R_0)} = \frac{h_1''}{2 \cdot R_0}. \quad (15)$$

Согласно имеющимся данным [8-13], в центробежном поле при истечении жидкостей через цилиндрические сопла и распылители замечено, что при длине более 3 мм происходит отрыв струи от стенок сопла, т.е. при дальнейшем движении жидкость не заполняет сечение сопла полностью. Это происходит за счет изменения (возрастания) центробежной силы, действующей на текущую в канале сопла жидкость. Следовательно, к условию цилиндрического насадка необходимо добавить условие, чтобы угол конусности соответствовал профилю потока жидкости в насадке. Для упрощения считаем, что сечение потока уменьшается пропорционально увеличению скорости. В данном случае потери скорости на трение при движении по конусу минимальны и в расчете ими пренебрегаем. Согласно этому запишем из условия неразрывности:

$$U_{R0} \cdot f_{R0} = U_{R2} \cdot f_{R2} = U_{R1} \cdot f_{R1} = \text{const}, \quad (16)$$

где f'' - сечение струи; f - сечение канала из условия равенства сечений канала; U_{R0} и U_{Ri} - скорость жидкости на радиусах R_0 и R_i .

Скорость в сечении R_0 можно взять как отношение расхода тяжелой жидкости к площади

сечения R_0 , тогда скорость в сечении R_1 определим из следующих соображений. Поскольку нас интересует качественная картина истечения, а не количественная его сторона, то рассмотрим два случая:

1) При однофазном истечении жидкости из цилиндрического насадка в центробежном поле, как отмечено выше, происходит отрыв струи от стенок и после 2-3 мм происходит свободное течение с ускорением $\omega^2 R$, то есть сечение струи будет изменяться пропорционально значению радиуса:

$$f_i'' = f_0 \frac{U_{R0}}{U_{iuc} \cdot R_i} \text{ и } h_i'' = h_0 \cdot \frac{R_0}{R_i} \div \frac{U_{R0}}{U_{Ri}}, \quad (17)$$

где $f_0 = 2\pi \cdot R_0 \cdot h_0$, $f_i'' = 2\pi \cdot R_i \cdot h_i''$, h_i'' - высота потока жидкости на R_i радиусе.

Когда насадок выполнен в виде плоскопараллельного ротора, то к выражению (17) добавится геометрический фактор постоянство сечения по направлению радиуса:

$$2 \cdot \pi \cdot R_0 \cdot h_0 = 2 \cdot \pi \cdot R_i \cdot h_i = 2 \cdot \pi \cdot R_i \cdot h_i'' = \text{const}. \quad (18)$$

Отсюда следует, чтобы выполнить это условие «цилиндричности» необходимо изменять высоту проходного сечения по зависимости:

$$h_i'' = \frac{R_0 \cdot h_0}{R_i}. \quad (19)$$

В итоге, мы имеем две составляющие угла раствора (α_1), которые будут определяться из соотношения:

$$(h_i)_1 = h_i'' + h_i''' = h_0 \left(\frac{R_0}{R_i} \right) \left(1 + \frac{U_i}{U_{Ri}} \right), \quad (20)$$

откуда

$$\operatorname{tg} \alpha_1 = 0.5 \cdot h_0 \frac{\left[1 - \left(\frac{R_0}{R_i} \right) \left(1 + \frac{U_{R0}}{U_{Ri}} \right) \right]}{R_i - R_0}. \quad (21)$$

Следовательно, рациональный угол раствора насадка (контактной зоны ротора) для однофазного истечения жидкости под действием центробежного поля будет равен:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{h_0}{(R_i - R_0)} \left[1 - \left(\frac{R_0}{R_i} \right) \left(\frac{U_{R0}}{U_{Ri}} \right) \right] + 0.23, \quad (22)$$

где $\operatorname{tg} \alpha' = \operatorname{tg} 13^\circ = 0.23$.

2) Двухфазное истечение жидкостей. Рассмотрим плоскоцилиндрический ротор дифференциально-контактного экстрактора как насадок с противоточным движением в нем двух фаз. Учитывая, что скорость движения дисперсной фазы на порядок больше по величине сплошной фазы, то принимаем допущение, что уменьшение скорости U_2 незначительно, подтверждаемое как экспериментальными, так и литературными данными [12].

Отсюда можно предположить, что незанятая струей полость насадка будет просто

заполнена другой фазой. Следовательно, выводы по первому случаю можно использовать и для второго, внося, соответственно, поправку на скорость в сечении R_1 в уравнении (22), получим:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{h_0}{(R_1 - R_0)} \left[1 - \left(\frac{R_0}{R_1} \right) \left(1 + \frac{U_1}{U_{\text{всн}} - W} \right) \right] + 0.23, \quad (23)$$

Данное выражение (23) и будет гипотетичным предложением изменения высоты проходного сечения внутрироторного пространства для радиальных двухфазных потоков, с точки зрения рациональной формы гидравлического насадка. Однако это условие не является оптимальным с точки зрения массоотдачи и эффективности работы центробежного экстрактора.

Таким образом, становится возможным определить оптимальный угол насадки исходя из гидравлических условий движения потоков в проходном сечении центробежного аппарата безнапорного типа. Дальнейшие исследования в данной области предполагают оценку влияния изменения геометрии насадка на процесс массообмена.

Литература

1. И.Р. Калимуллин, А. В. Дмитриев, А. Н. Николаев, Вестник Казанского технологического университета, **15**, 11, 153-155 (2012).
2. Л.Н. Москалев, С. И. Поникаров, И. И. Поникаров, Вестник Казанского технологического университета, **14**, 14, 235-241 (2011).
3. Б. Гебрахт, *Свободно-конвективные течения, тепло- и массообмен: пер. с англ.* Мир, Москва, 1991. 678 с.
4. Е.В. Аметистов, *Тепло-массообмен: Справочник.* Энергоиздат, Москва, 1982. 512 с.
5. Н.З. Френкель, *Гидравлика.* Госэнергоатомиздат, Москва, 1956. 456 с.
6. И.Е. Идельчик, *Аэродинамика технологических аппаратов.* Машиностроение, Москва, 1983. 351 с.
7. М.Е. Дейч, А.Е. Зарянкин, *Гидрогазодинамика: учебное пособие для вузов.* Энергоатомиздат, Москва, 1984. 384 с.
8. Гришин, Н.С. Исследование гидродинамических процессов в центробежном экстракторе и иксообразной насадкой: дис. ... канд. техн. наук / Н.С.Гришин. – 1975. – 152 с.
9. Бочкарев, В.Г. Экспериментальное исследование течения жидкостей через отверстия в контактных элементах центробежных экстракционных аппаратов: дис. ... канд. техн. наук / В.Г. Бочкарев. – Казань, 1969. – 146 с.
10. Ластовцев, А.М. Пропускная способность вращающихся распылителей / А.М. Ластовцев // Тр. МИХМ. – Вып. 11. – 1957. – С. 71-82.
11. Ластовцев, А.М. Уравнение дробления жидкости вращающимися распылителями / А.М. Ластовцев // Тр. МИХМ. – Вып. 13. – 1957. – С. 29-42
12. Шарифуллин, Р.Г. Исследование процесса истечения жидкостей из насадков в поле действия центробежных сил: дис. ... канд. техн. наук / Р.Г. Шарифуллин. – Казань, 1981. – 112 с.
13. Ш.А. Шибазов, В.И. Ашихмин, Изв. вузов. Сер. «Нефть и Газ», 9, 61-64 (1972).

© А. А. Салин - асс. каф. машин и аппаратов химических производств КНИТУ, c888aa@mail.ru; Н. С. Гришин – д-р техн. наук, проф. той же кафедры; С. И. Поникаров – д-р техн. наук, проф., зав. каф. машин и аппаратов химических производств КНИТУ, mahp_kstu@mail.ru.