

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 t вдоль оси r войдет масса жидкости, равная M_r : . (1) На противоположной грани выделенного объема скорость и плотность жидкости изменятся, и будут соответственно равны и . Тогда через эту грань $[(r+dr) \cdot d\phi \cdot dz]$ за то же время dt выйдет масса жидкости равная M_r+dr : . (2) Пренебрегая членом высшего порядка малости, приращение массы в элементарном объеме вдоль оси r составит: . (3) По аналогии находим приращение массы в выделенном объеме вдоль осей ϕ и z : ; (4) . (5) Полное приращение массы в элементарном объеме за время dt будет равно сумме найденных приращений: . (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: . (7) Для установившегося движения , масса элементарного объема жидкости не изменяется, следовательно: . (8) Для капельных жидкостей, которые практически несжимаемы ($\rho = \text{const}$) уравнение неразрывности можно записать в виде: . (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: . (10) Разделив переменные и интегрируя, получим: , откуда . Из рисунка видно, что , следовательно . 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 плоско-цилиндрическом 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 Лавалля), определим рациональный угол раствора элементов для центробежного аппарата, разложив его на три составляющих угла наклона насадка: α' , (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 u 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: , (12) откуда ; (13) или . (14) Подставляя значение h_0 , из уравнения (3), получим: . (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: , (16) где f'' - сечение струи; f - сечение канала из условия равенства сечений канала; U_{R_0} и U_{R_i} 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: , (17) где , , - 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: . (18) Отсюда следует, чтобы выполнить это условие «цилиндричности» необходимо изменять высоту проходного сечения по зависимости: . (19) В итоге, мы имеем две составляющие угла раствора (α_1), которые будут определяться из соотношения: , (20) откуда . (21) Следовательно, рациональный угол раствора насадка (контактной зоны ротора) для однофазного истечения жидкости под действием центробежного поля будет равен: , (22) где . 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 R1 в уравнении (22), получим: , (23) Данное выражение (23) и будет гипотетичным предложением изменения высоты проходного сечения внутривихревого 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.