

ОБОСНОВАНИЕ ДИАМЕТРА ОТВЕРСТИЙ ФОРСУНОК ПОЛОЙ РАМЫ ДЛЯ ПРОМЫВКИ ФИЛЬТРУЮЩЕГО РОТОРА ЦЕНТРИФУГИ

БОГДАНОВ Андрей Владимирович, Южно-Уральский государственный аграрный университет

ПОПОВА Светлана Юрьевна, Южно-Уральский государственный аграрный университет

ПТАШКИНА-ГИРИНА Ольга Степановна, Южно-Уральский государственный аграрный университет

КУЧУГУЛОВА Эльвира Марсэлевна, Южно-Уральский государственный аграрный университет

Представлено теоретическое обоснование диаметра отверстий форсунок полой рамы, установленной внутри фильтрующего ротора центрифуги. Получена теоретическая зависимость по определению этого диаметра. При определении диаметра было выявлено, что необходимо учитывать количество форсунок, расположенныхных на полой раме. Это позволит обеспечить равномерную и качественную промывку фильтрующего ротора центрифуги.

Введение. Существующие центрифуги, используемые в пищевой промышленности, наряду с положительными качествами имеют недостатки, одним из которых является периодическая разборка-сборка конструкции для промывки фильтрующего ротора. Это снижает производительность самой центрифуги и ухудшает условия труда. Поэтому нами предложена центрифуга, в которой предусмотрена промывка фильтрующего ротора без ее разборки-сборки [9].

Методика исследований. Центрифуга с промывкой фильтрующего ротора (рис. 1) работает следующим образом. Через расположенный в корпусе 1 патрубок 4 для подачи суспензии центрифугируемая масса подается в конический фильтрующий ротор 2. При этом под действием нормальной составляющей центробежной силы происходит разделение центрифугируемой массы на жидкую (оттек) и твердую (осадок) фазы. Твердая фаза слетает с верхнего края фильтрующего ротора 2 в приемник 10 твердой фазы,

а жидкая, пройдя через фильтрующее сито 3, попадает в приемник 8 жидкой фазы в виде быстро вращающегося кольца аэрозоли и мелких капель, которые оседают на цилиндрической стенке приемника 8 жидкой фазы и стекают вниз по пластинам 9 и прорезям, и далее по патрубку 12 отводятся из приемника 8 жидкой фазы. Расположенные наклонно круговые пластины 9 с дуговыми прорезями и дефлектор 11 обеспечивают отвод жидкой фазы и аэрозоли в нижнюю часть приемника 8 жидкой фазы и далее в патрубок 12, что исключает проникновение аэрозоли жидкой фазы в приемник 10 твердой фазы.

После завершения цикла центрифугирования по патрубку 5 для подачи промывной жидкости и теплоносителя под давлением происходит подача промывной жидкости в полую раму 6 с форсунками 7, установленными под углом к ее корпусу, что обеспечивает создание реактивной силы струи промывной жидкости. Под действием реактивной силы происходит вра-

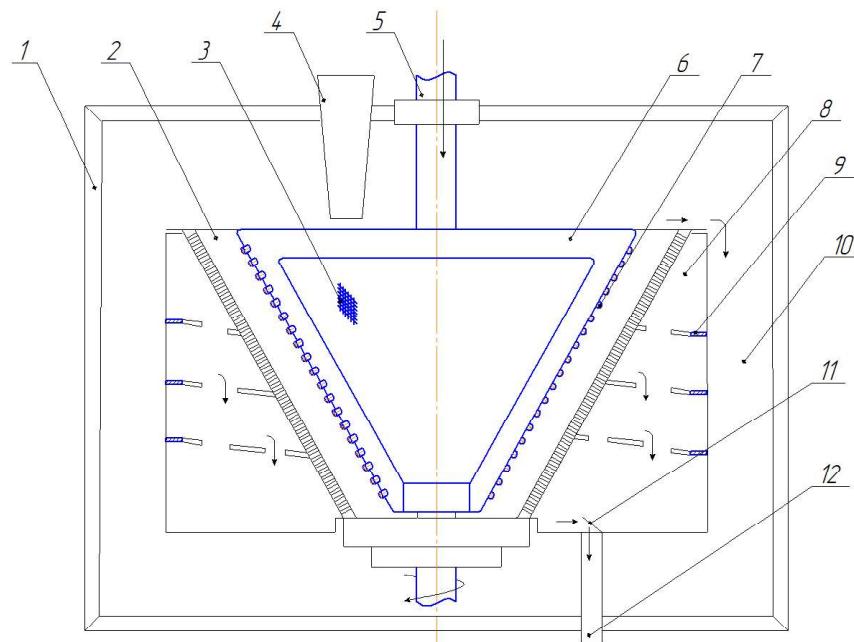


Рис. 1. Схема центрифуги с промывкой фильтрующего ротора:
1 – корпус; 2 – фильтрующий ротор; 3 – фильтрующее сито; 4 – патрубок для подачи суспензии; 5 – патрубок для подачи промывной жидкости; 6 – полая рама; 7 – форсунки; 8 – приемник жидкой фазы; 9 – круговые пластины; 10 – приемник твердой фазы; 11 – дефлектор; 12 – патрубок для отвода жидкой фазы



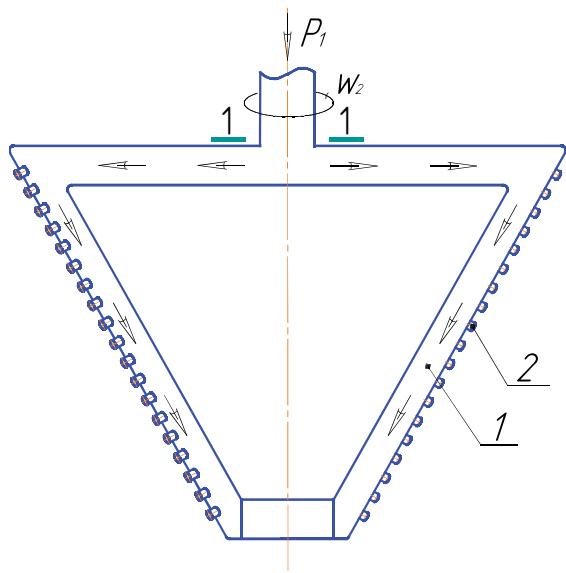


Рис. 2. Схема рамки с форсунками:
1 – полая рама; 2 – форсунки

Результаты исследований. Промывная жидкость под давлением подается на вход полой рамы, а возникающие при этом реактивные силы струй, выходящих из форсунок, создают крутящий момент, за счет которого рама вращается относительно вертикальной оси.

Необходимым условием определения диаметра выходных отверстий форсунок является определение относительной скорости истечения жидкости из форсунки. Для этого воспользуемся уравнением Бернулли для относительного (вращательного) движения [3, 4], считая, что жидкость находится в полой раме в относительном покое

$$z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} + h_n + \Delta H_{ин}, \quad (1)$$

где z_1, z_2 – удельная потенциальная энергия положения относительно плоскости отсчета (геометрический напор), м; $\frac{P_1}{\rho g}, \frac{P_2}{\rho g}$ – удельная потенциальная энергия давления дна двух сечений, м; P_1 – избыточное давление на входе в полую раму, Па; P_2 – избыточное давление на выходе из форсунки, Па; ρ – плотность жидкости, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с²; $\frac{\alpha_1 V_1^2}{2g}, \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g}$ –

удельная кинетическая энергия, м; α_1, α_2 – коэффициенты, учитывающие отношение действительной кинетической энергии к кинетической энергии, подсчитанной по средней скорости (коэффициенты Кориолиса), $\alpha_1 \approx \alpha_2 \approx 1$; V_1 – средняя скорость жидкости в подводящей трубке, м/с; V_2 – средняя скорость истечения жидкости из форсунки, м/с; h_n – потери напора в форсунках ($h_n = \zeta \frac{V_2^2}{2g}$), м; ζ – коэффициент сопротивления форсунки, $\zeta \approx 0,5 \dots 0,6$ [1, 5]; $\Delta H_{ин}$ – инерционный напор (работа сил инерции, отнесенная к единице веса жидкости), м.

При вращении канала с жидкостью (полой рамы с промывной жидкостью) вокруг вертикальной оси с постоянной скоростью инерционный напор определяется по следующему выражению [7]:

$$\Delta H_{ин} = \frac{\omega^2}{2g} (r_1^2 - r_2^2) = \frac{u_1^2}{2g} - \frac{u_2^2}{2g}, \quad (2)$$

где ω – угловая скорость вращения полой рамы, рад/с; r_1 – расстояние центра тяжести сечения 1-1 (см. рис. 2) на входе полой рамы от оси вращения, м; r_2 – расстояние центра тяжести сечения 2-2 (рис. 3, а) на выходе из форсунки от оси вращения, м; u_1 – скорость центра тяжести сечения 1-1 (см. рис. 2) во вращательном движении, м/с; u_2 – скорость центра тяжести сечения 2-2 (см. рис. 3, а) во вращательном движении, м/с.

Величины, отмеченные индексом 1 (см. рис. 2), относятся к сечению 1-1 (вход в трубку, по которой жидкость подводится к форсунке), а индексом 2 (см. рис. 3, а) – к сечению 2-2 (на выходе из форсунки). Поскольку скорость жидкости в подводящей трубке находится в относительном покое $V_1 \ll V_2$, примем $V_1 = 0$. Учитывая, что размеры рамки относительно невелики, то можно принять $z_1 \approx z_2 = 0$. Избыточное давление $P_2 = 0$. Так как рас-

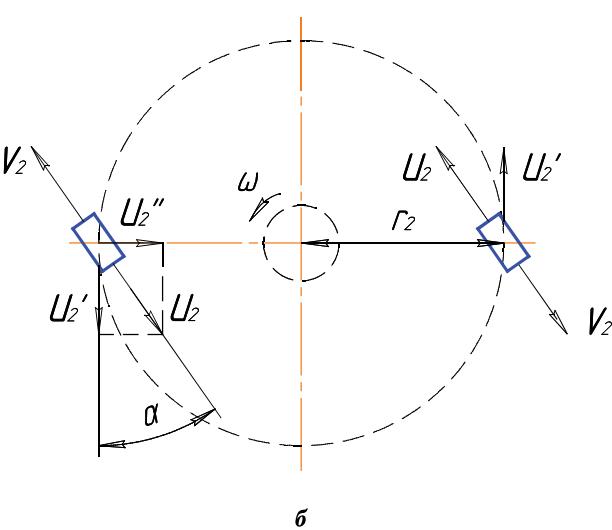
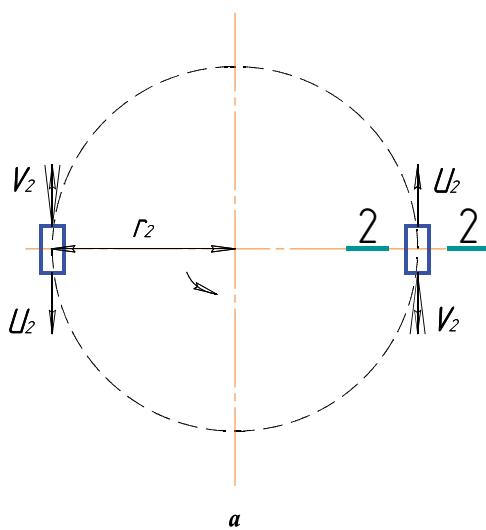


Рис. 3. Схема расположения форсунок: а – на касательной; б – под углом к касательной



стояние центра тяжести сечения 1-1 на входе полой рамы находится вблизи от оси вращения, то $r_1 \approx 0$. Поэтому и $u_1 \approx 0$. С учетом этого и совместного решения уравнений (1) и (2), получим

$$\frac{P_1}{\rho g} = \frac{V_2^2}{2g} - \frac{u_2^2}{2g} + \zeta \frac{V_2^2}{2g}. \quad (3)$$

Преобразуя равенство (3), получим выражение для определения средней скорости истечения жидкости из форсунки

$$V_2 = \sqrt{\frac{2P_1 + \rho u_2^2}{\rho(1 + \zeta)}}. \quad (4)$$

Линейную окружную скорость сечения 2-2 рассчитывают по следующему выражению:

$$u_2 = \frac{2\pi r_2 n}{60}, \quad (5)$$

где n – частота вращения полой рамы, мин⁻¹.

С учетом формулы (5) выражение (4) примет следующий вид:

$$V_2 = \sqrt{\frac{2P_1 + \frac{\rho(\pi r_2 n)^2}{900}}{\rho(1 + \zeta)}}. \quad (6)$$

Полученная зависимость (6) позволяет рассчитать среднюю скорость истечения жидкости из форсунки, зная избыточное давление на входе в полую раму, плотность жидкости, расстояние от центра тяжести сечения форсунки до оси вращения полой рамы и частоты ее вращения для схемы, представленной на рис. 3, а. Согласно рис. 3, а направления векторов скоростей V_2 и u_2 лежат на касательной к окружности. Но для промывки фильтрующего ротора форсунки необходимо располагать под определенным углом α к касательной (см. рис. 3, б).

Согласно рис. 3, б линейная скорость центра тяжести форсунки, направленная по касательной к окружности, найдется из следующего выражения

$$u'_2 = u_2 \cos \alpha, \quad (7)$$

где u'_2 – линейная скорость центра тяжести форсунки, м/с; α – угол между касательной и направлением вектора скорости струи промывной жидкости, исходящей из форсунки (угол установки форсунки), град.

С другой стороны, скорость u'_2 (см. рис. 3, б) можно определить исходя из выражения 5

$$u'_2 = \frac{2\pi r_2 n}{60}. \quad (8)$$

Решая совместно уравнения (7) и (8), найдем величину u_2 :

$$u_2 = \frac{2\pi r_2 n}{60 \cos \alpha}. \quad (9)$$

Подставляя скорость u_2 из выражения (9) в равенство (6), получим

$$V_2 = \sqrt{\frac{2P_1 + \frac{\rho}{900} \cdot \left(\frac{2\pi r_2 n}{60 \cos \alpha}\right)^2}{\rho(1 + \zeta)}}. \quad (10)$$

Формула (10) позволяет рассчитать среднюю скорость истечения жидкости из форсунки, установленной под углом α . Для анализа формулы (10) построим график изменения скорости V_2 от угла α при прочих равных условиях (рис. 4). Примем $P_1 = 400$ кПа, $\rho = 1000$ кг/м³, $r_2 = 0,5$ м, $n = 1000$ мин⁻¹, $\zeta = 0,5$, $0^\circ \leq \alpha < 90^\circ$.

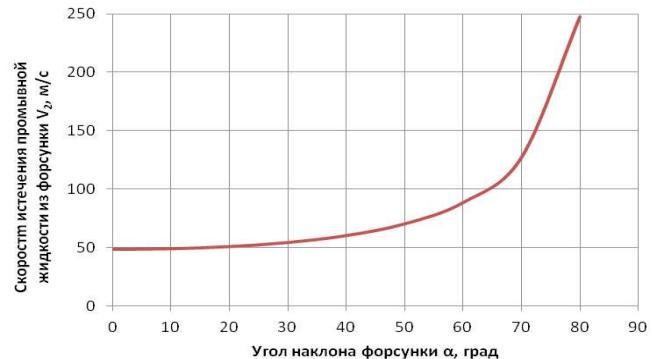


Рис. 4. Зависимость изменения скорости истечения промывной жидкости из форсунки V_2 от угла наклона форсунки α (при $P_1 = 400$ кПа, $\rho = 1000$ кг/м³, $r_2 = 0,5$ м, $n = 1000$ мин⁻¹, $\zeta = 0,5$, $0^\circ \leq \alpha < 90^\circ$)

Из графика (см. рис. 4) видно, что при увеличении угла наклона форсунки α скорость истечения промывной жидкости V_2 также увеличивается. То есть для сохранения частоты вращения полой рамы (например, $n = 1000$ мин⁻¹) при увеличении угла α необходимо повышать скорость истечения промывкой жидкости V_2 .

Значение скорости также V_2 необходимо для расчета момента, возникающего от действия реактивной силы струи (рис. 5) [2].

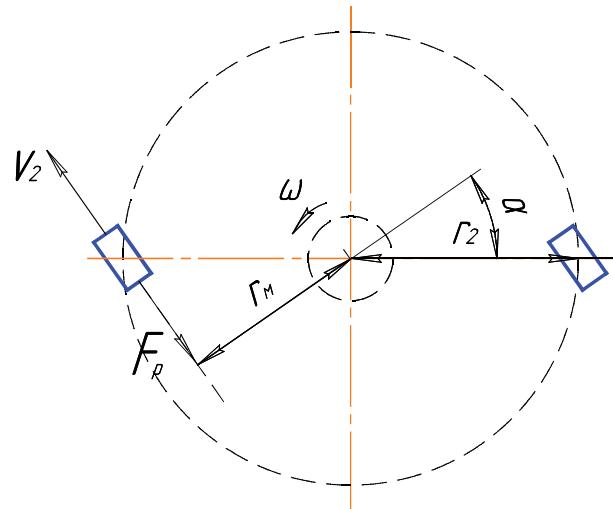


Рис. 5. Расчетная схема для определения момента от действия реактивной силы

Исходя из рис. 5, запишем формулу для определения суммарного момента (для двух форсунок)

$$M = 2F_p r_m, \quad (11)$$

где M – момент, возникающий от реактивных сил струй, выходящих из двух форсунок полой рамы, Н·м; F_p – реактивная сила струи от промывной жидкости, выходящей из форсунки, Н; r_m – плечо силы F_p (расстояние от оси вращения полой рамы до линии действия силы F_p), м.



Реактивная сила струи от промывной жидкости, выходящей из форсунки, найдется из следующего выражения [8, 10]:

$$F_p = \rho Q V_2, \quad (12)$$

где Q – расход жидкости через форсунку, $\text{м}^3/\text{с}$.

Для определения силы по выражению (12) необходимо знать расход жидкости [6]:

$$Q = SV_2 = \frac{\pi d^2}{4} V_2, \quad (13)$$

где S – площадь поперечного сечения выходного отверстия форсунки, м^2 ; d – диаметр выходного отверстия форсунки, м.

Подставляя значение Q из выражения (13) в равенство (12), найдем реактивную силу струи от промывной жидкости:

$$F_p = \rho \frac{\pi d^2}{4} V_2^2. \quad (14)$$

В выражении (11) плечо силы r_m можно найти из рис. 5:

$$r_m = r_2 \cos \alpha. \quad (15)$$

С учетом выражений (14) и (15) выражение (11) примет следующий вид:

$$M = 2\rho \frac{\pi d^2}{4} V_2^2 r_2 \cos \alpha. \quad (16)$$

Таким образом, из выражения (16) получим

$$d = \sqrt{\frac{2M}{\rho \pi V_2^2 r_2 \cos \alpha}}. \quad (17)$$

Подставляя величину V_2 из выражения (10), после математических преобразований получим:

$$d = \sqrt{\frac{1800 M (1 + \zeta) \cos \alpha}{1800 P_1 \pi r_2 + \rho \pi^3 r_2^3 n^2}}. \quad (18)$$

Заключение. Полученная формула позволяет определить диаметр форсунки. Необходимо отметить, что при расчете диаметра нужно также учитывать количество форсунок, расположенных на полой раме. Это позволит обеспечить равномерную и качественную промывку фильтрующего ротора центрифуги.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров Ю.Б., Кузьмин В.А., Панченко В.И. Расчет гидравлических систем: учеб. пособие. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2010. – 59 с.

2. Богданов А.В., Попова С.Ю., Кучугурова Э.М. Повышение производительности и безопасности труда при использовании центрифуги с промывкой фильтрующего ротора // Актуальные вопросы агронженерных наук в сфере технического сервиса машин, оборудования и безопасности жизнедеятельности: теория и практика: матер. нац. науч. конф. Института агронженерии / под ред. С.А. Гриценко. – Челябинск, 2020. – 204 с.

3. Вихарев А.Н., Долгова И.И. Гидравлика. Режимы движения, уравнение Бернулли, потери напора, каналы: учеб. пособие. – Архангельск: Изд-во АГТУ, 2001. – 92 с.

4. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы: учебник для машиностроительных вузов / Т.М. Башта [и др.]. – М.: Машиностроение, 1982. – 423 с.

5. Гидравлика и сельскохозяйственное водоснабжение: учеб. пособие / О.С. Пташкина-Гирина [и др.]. – СПб.: Лань, 2017. – 212 с.

6. Калинин А.В., Козлов Г.С. Методические указания для студентов очно-заочной формы обучения по дисциплинам: «Гидравлика», «Гидравлика и гидравлические машины». – Тольятти, 2003. – 66 с.

7. Машиностроительная гидравлика. Примеры расчетов / В.В. Вакина [и др.]. – Киев, 1986. – 208 с.

8. Пажи Д.Г., Галустов В.С. Основы техники распыливания жидкостей. – М.: Химия, 1984. – 256 с.

9. Пат. 195598 РФ МПК B04/B 3/00, B04B 15/06. Центрифуга с промывкой фильтрующего ротора / А.В. Богданов, С.Ю. Попова, Э.М. Кучугурова, С.В. Ганенко; заявитель и патентообладатель Южно-Уральский государственный аграрный университет. № 2019124908, заявл. 05.08.2019; опубл. 31.01.2020, Бюл. №4.

10. Распыливание жидкости форсунками / Л.А. Витман [и др.]. – М.: Книга по Требованию, 2014. – 266 с.

Богданов Андрей Владимирович, д-р техн. наук, доцент кафедры «Технический сервис машин, оборудования и безопасность жизнедеятельности», Южно-Уральский государственный аграрный университет. Россия.

Попова Светлана Юрьевна, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Технический сервис машин, оборудования и безопасность жизнедеятельности», Южно-Уральский государственный аграрный университет. Россия.

Пташкина-Гирина Ольга Степановна, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Энергообеспечение и автоматизация технологических процессов», Южно-Уральский государственный аграрный университет. Россия.

Кучугурова Эльвира Марсэлевна, аспирант кафедры «Технический сервис машин, оборудования и безопасность жизнедеятельности», Южно-Уральский государственный аграрный университет. Россия.

454080, г. Челябинск, просп. Ленина, 75.
Тел.: (8351) 265-56-08.

Ключевые слова: центрифуга; фильтрующий ротор; диаметр отверстий форсунок; реактивная сила струи.

JUSTIFICATION OF THE DIAMETER OF THE NOZZLE HOLES OF THE HOLLOW FRAME FOR FLUSHING THE FILTER ROTOR OF THE CENTRIFUGE

Bogdanov Andrey Vladimirovich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of the chair “Technical Service of Machinery, Equipment and Life Safety”, South Ural State Agrarian University. Russia.

Popova Svetlana Yurevna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the chair “Technical Service of Machinery, Equipment and Life Safety”, South Ural State Agrarian University. Russia.

Pta什kina-Girina Olga Stepanovna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the chair “Technical Service of Machinery, Equipment and Life Safety”, South Ural State Agrarian University. Russia.

Kuchugulova Elvira Marselevna, Post-graduate Student of the chair “Technical Service of Machinery, Equipment and Life Safety”, South Ural State Agrarian University. Russia.

Keywords: centrifuge; filtering the rotor; the diameter of the holes of the nozzles; the reaction force of the jet.

The article presents a theoretical justification for the diameter of the nozzle holes of a hollow frame installed inside the filter rotor of a centrifuge. A theoretical dependence on the definition of this diameter is obtained. When determining the diameter, it was found that it is necessary to take into account the number of nozzles located on the hollow frame. This will ensure uniform and high-quality flushing of the filter rotor of the centrifuge.

