

## Условия эффективного разделения пивной дробины в вибрационно-центробежной центрифуге

*В.Н. Николаев, к.т.н., М.С. Ахметвалиев, соискатель,  
А.В. Литаш, соискатель, В.В. Первушин, магистрант,  
ФГБОУ ВО Южно-Уральский ГАУ*

Высокий уровень продуктивности сельскохозяйственных животных, их здоровье и качество получаемой от них продукции во многом зависят от полноценного кормления, формирования прочной кормовой базы и рационального использования всех кормовых источников для балансирования рационов. В пополнении кормовой базы весьма актуально использование побочных продуктов пивоваренного производства: пивной дробины, солодовых ростков и дрожжей. Исходная пивная дробина обладает высоким количеством воды. В 1 кг пивной дробины содержится 0,8 ЭКЕ, 42 г переваримого протеина. Крупному рогатому скоту выдают в составе кормовой смеси до 20 кг пивной дробины, свиноматкам и хрякам – 4–6 кг на голову в сутки. Пивная дробина, прошедшая сушку, является очень питательным концентрированным кормом. Она используется в качестве сырья в приготовлении комбикормов [1].

В решении проблемы утилизации отходов пивоваренного производства и реализации их в качестве кормовых добавок актуальным вопросом является разработка прогрессивного ресурсосберегающего оборудования [2, 3].

Известно, что основным недостатком пивной дробины является относительно небольшой срок хранения из-за высокой влажности, создающий ряд проблем при её использовании [2–4], поэтому необходимо проводить обезвоживание пивной дробины в центрифугах с последующей сушкой или прессованием, что позволит длительное время хранить сухой корм до его реализации.

**Цель исследования** – определение условий эффективного разделения пивной дробины в вибрационно-центробежной центрифуге на густую и жидкую фракции.

**Материал и методы исследования.** Для разделения пивной дробины на жидкую и густую фракции нами предложена вибрационно-центробежная центрифуга [5–8], в которой ротор снабжён перфорированными прямолинейными и криволинейными лопастями, установленными друг за другом по ходу его вращения, и он совершают осевые вибрации в вертикальной плоскости перпендикулярно плоскости своего вращения.

На рисунке 1 представлена схема разделения пивной дробины на жидкую и густую фракции на лопастях ротора предлагаемой вибрационно-центробежной центрифуги. Эта схема поясняет, что исходная масса пивной дробины в первую очередь подаётся на прямолинейную лопасть с прямоугольными отверстиями высотой до 2 мм.

На этой лопасти осуществляется первичная фильтрация пивной дробины, большая её часть густой фракции задерживается и центробежными силами выбрасывается из центрифуги. Жидкая фракция пивной дробины с твёрдыми частицами меньше 2 мм попадает для окончательного разделения по такому же принципу на криволинейную лопасть с прямоугольными отверстиями высотой до 0,25 мм. В результате очистки жидкой фракции от твёрдых частиц на криволинейной лопасти она собирается в патрубки для удаления из центрифуги.

В итоге происходит дифференциация (разделение) исходной массы жидкого потока в процессе разделения пивной дробины на жидкую и густую фракции и обеспечение тем самым равнотолщинного слоя фильтруемого материала по всей поверхности лопастей вращающегося ротора с осевыми колебаниями, которые способствуют эффективной фильтрации и снижают забивание отверстий перфорированных лопастей.

В создании непрерывного технологического процесса центрифуги необходимо взаимно увязать между собой производительность операций: подачу исходной массы пивной дробины и обработку её на роторе. При этом обеспечение условий непрерывности потока и баланса влаги математически выражается зависимостью:

$$Q_u \leq n \cdot (Q_{\text{ж}} + Q_e), \quad (1)$$

где  $n$  — количество пар прямолинейной и криволинейной лопастей на роторе, шт.;

$Q_u$  — производительность подачи исходной пивной дробины в ротор центрифуги, кг/с;

$Q_{\text{ж}}$  — производительность центрифуги по выходу жидкой фазы (фильтрата), кг/с.

Производительность подачи исходной пивной дробины в ротор центрифуги рассчитывается как:

$$Q_u = \rho_{nd}^{uc} \cdot S_{\text{ж}} \cdot v_u = \rho_{nd}^{uc} \cdot S_{\text{ж}} \cdot \phi \sqrt{2g \cdot h_n}, \quad (2)$$

где  $\rho_{nd}^{uc}$  — плотность исходной пивной дробины, кг/м<sup>3</sup>;

$S_{\text{ж}}$  — площадь живого сечения подачи, м<sup>2</sup>;  
 $v_u$  — скорость движения пивной дробины по лопасти, м/с;  
 $\phi$  — коэффициент истечения.

Производительность центрифуги по выходу жидкой фазы (фильтрата) рассчитывается как:

$$Q_{\text{ж}} = \rho_{\text{ж}} \cdot \xi \cdot F_a \cdot v_{\phi} \cdot n_a, \quad (3)$$

где  $\rho_{\text{ж}}$  — плотность фильтрата, кг/м<sup>3</sup>;  
 $\xi$  — удельная площадь отверстий фильтрационной поверхности;  
 $F_a$  — площадь фильтрующей поверхности лопасти;

$v_{\phi}$  — скорость фильтрации, м/с.

Выражение удельной площади отверстий фильтровальной поверхности имеет вид:

$$\xi = \frac{S_{om}}{F_e} \cdot n_{om}, \quad (4)$$

где  $S_{om}$  — площадь одного отверстия фильтрационной поверхности, м<sup>2</sup>;

$F_e$  — единица площади фильтрующей поверхности, м<sup>2</sup>;

$n_{om}$  — количество отверстий на единице площади фильтрующей поверхности.

Площадь лопасти рассчитывается по выражению:

$$F_a = H_a \cdot L_a, \quad (5)$$

где  $H_a$  — высота лопасти, м;

$L_a$  — длина лопасти, м.

**Результаты исследования.** Длину прямолинейной лопасти определим исходя из размеров ротора центрифуги (рис. 2).

Длина прямолинейной лопасти  $L_a^{np}$  определяется как:

$$L_a^{np} = \frac{r_d - r_0 \cdot \cos \theta_3}{\cos \theta_2}, \quad (6)$$

где  $r_0$  — радиус горловины ротора центрифуги, м;

$r_d$  — радиус ротора центрифуги, м.

Углы треугольника  $\Delta r_0 r_d L_a^{np}$  можно рассчитать как:

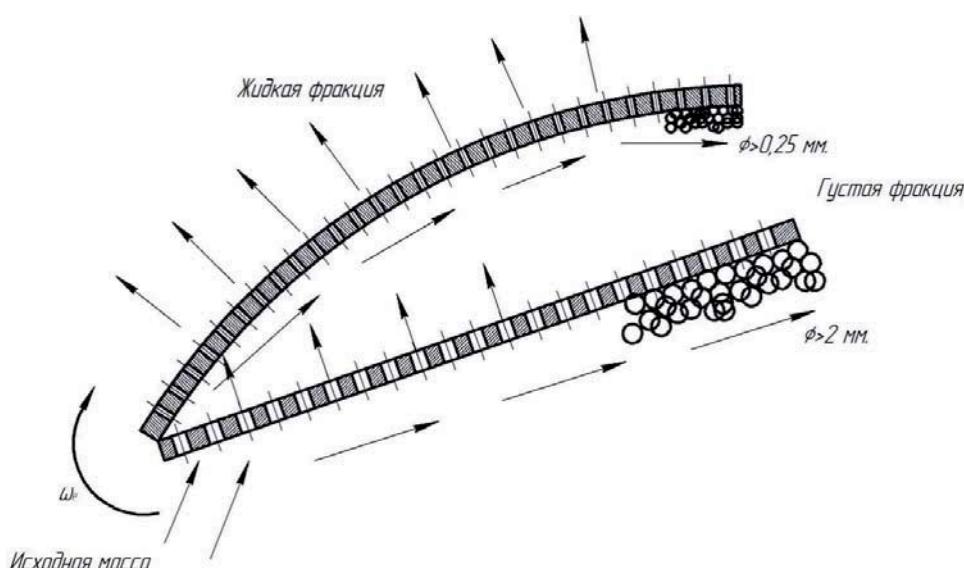


Рис. 1 – Схема разделения потока пивной дробины на лопастях вибрирующего ротора

$$\theta_1 = 180 - \alpha + \beta; \quad (7)$$

$$\theta_2 = \arcsin\left(\frac{r_0}{r_\delta} \cdot \sin \theta_1\right); \quad (8)$$

$$\theta_3 = 180 - (\theta_1 + \theta_2), \quad (9)$$

где  $\alpha$  – угол установки лопасти, град.;  
 $\beta$  – угол атаки лопасти, град.

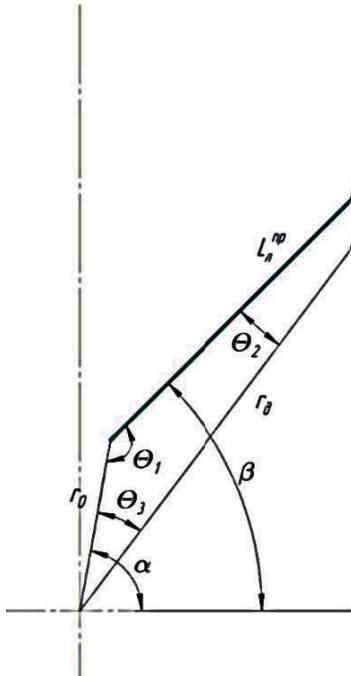


Рис. 2 – Схема прямолинейной лопасти ротора центрифуги

Угол установки и угол атаки во многом зависят от физико-механических свойств пивной дробины, а также от конструкции перфорированных лопастей. Наибольшее влияние на углы оказывает коэффициент трения, который мы принимаем постоянным, так как воздействие осевой вибрации при разделении супензии пивной дробины на изменение коэффициента трения незначительно. Вибрация оказывает большее влияние на увеличение коэффициента проницаемости. Вследствие этого угол атаки выбираем в пределах изменения эффективного угла трения пивной дробины по перфорированным лопастям, который составляет от 45–55°.

Длина криволинейной лопасти  $L_a^{kp}$  (рис. 3) определяется, как:

$$L_a^{kp} = \frac{\pi \cdot R_a \cdot \Psi_k}{180}, \quad (10)$$

где  $R_a$  – радиус кривизны криволинейной лопасти, м;

$\Psi_k$  – угол сектора круга, град.

Угол сектора круга рассчитаем по выражению:

$$\Psi_k = \alpha \cos\left(1 - \frac{a^2}{2R_a^2}\right), \quad (11)$$

где  $a$  – хорда дуги окружности, м.

Выражение хорды дуги окружности имеет вид:

$$a = \sqrt{r_0^2 + r_\delta^2 - 2r_0r_\delta \cos \gamma_3}. \quad (12)$$

Углы треугольника  $\Delta r_0r_\delta a$  рассчитываем как:

$$\gamma_1 = 90 + \alpha + \beta; \quad (13)$$

$$\gamma_2 = \arcsin\left(\frac{r_0}{r_\delta} \cdot \sin \gamma_1\right); \quad (14)$$

$$\gamma_3 = 180 - (\gamma_1 + \gamma_2). \quad (15)$$

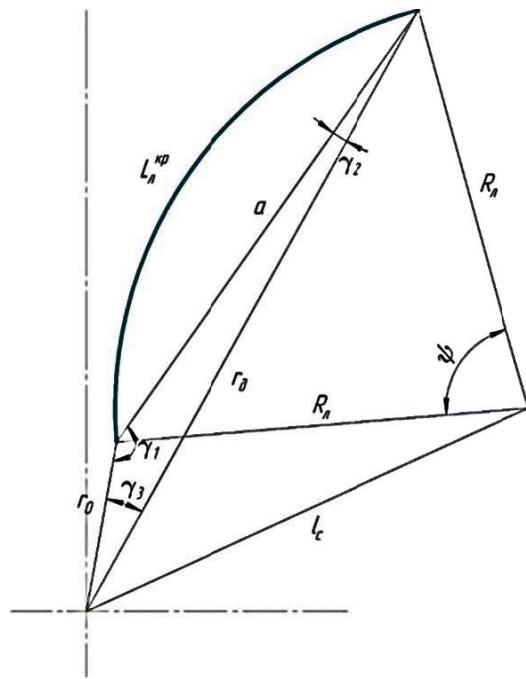


Рис. 3 – Схема криволинейной лопасти ротора центрифуги

Скорость фильтрования или скорость прохождения жидкой фазы через перфорированную перегородку для лопастной вибрационно-центротрекущей установки [9]:

$$v_\phi = \frac{k_c}{\mu} \cdot Fr \cdot g, \quad (16)$$

где  $v_\phi$  – скорость фильтрования, м/с;

$\mu$  – кинематическая вязкость супензии,  $10^{-6}$   $\text{м}^2/\text{с}$ ;

$k_c$  – коэффициент проницаемости супензии,  $\text{м}^2$ ;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с;

$F_r$  – фактор разделения.

Коэффициент проницаемости  $k_c$  В.И. Соколов [9] предлагает определять как:

$$k_c = \frac{0.246 \cdot B^3}{S^2 \cdot (1-B)^2}, \quad (17)$$

где  $B$  – часть объема супензии, занятая дисперсной средой ( $B \approx 0.7$ );

$S$  – удельная поверхность частицы,  $1/\text{м}$ .

Удельную поверхность частицы определяем как:

$$S = \frac{6}{d_3}, \quad (18)$$

где  $d_3$  – эквивалентный диаметр частицы.

С учетом (17) и (18) уравнение (16) примет вид:

$$\nu_\phi = \frac{0.246 \cdot B^3 \cdot d^2}{36\mu \cdot (1-B)^2} \cdot Fr \cdot g. \quad (19)$$

Одним из главных параметров центрифуг, определяющим напряжённость силового центробежного поля, является безразмерная величина – фактор разделения  $Fr$ . Фактор разделения показывает, во сколько раз развивающееся ускорение центробежного поля больше ускорения гравитационного поля в данной центрифуге и определяется по формуле: [9–11]:

$$Fr = \frac{\omega^2 r}{g}, \quad (20)$$

где  $\omega$  – угловая скорость вращения ротора,  $\text{с}^{-1}$ ;  
 $r$  – радиус ротора, м.

Уравнение (20) применяется для сплошных роторов (конических, цилиндрических, тарельчатых), а для лопастных центрифуг оно равно отношению ускорения Кориолиса к ускорению гравитационного поля [10]:

$$Fr = \frac{2\omega v_r}{g}, \quad (21)$$

где  $v_r$  – относительная скорость, м/с.

Уравнение (21) описывает фактор разделения, когда лопасть имеет форму в виде прямой, направленной по радиусу ротора.

В случае, когда лопасть отклонена на угол от радиуса или имеет форму дуги окружности, фактор разделения равен отношению ускорения Кориолиса и центробежного ускорения в переносном движении к ускорению гравитационного поля:

$$Fr = \frac{\omega_e^2 r \cdot \sin(\gamma) + 2\omega_e v_r}{g}, \quad (22)$$

где  $\gamma$  – угол между радиальным направлением и направлением лопасти, град.

Фактор разделения при осевой вибрации в случае, когда колебания направлены вверх на горизонтальный вращающийся ротор с лопастями (рис. 4), способствующими созданию микропор в осадке, равен [10]:

$$Fr_e = \frac{\omega_e^2 r \cdot \sin(\gamma) + 2\omega_e v_r}{g \left( 1 - \frac{A_k \omega_k^2 \sin(\omega_k t)}{g} \right)}, \quad (23)$$

где  $A_k$  – амплитуда колебаний ротора центрифуги, м;

$\omega_k$  – частота колебаний ротора центрифуги,  $\text{с}^{-1}$ .

Величина  $1 - \frac{A_k \omega_k^2 \sin(\omega_k t)}{g}$  показывает, что воз-

действие вибрации на вращающийся ротор способствует увеличению фактора разделения установки.

Для того, чтобы частица начала перемещаться по лопасти от воздействия вибрации, должно выполняться условие:

$$\Phi_e > F_{mpz} + G, \quad (24)$$

где  $\Phi_e$  – вибрационная сила инерции, Н;

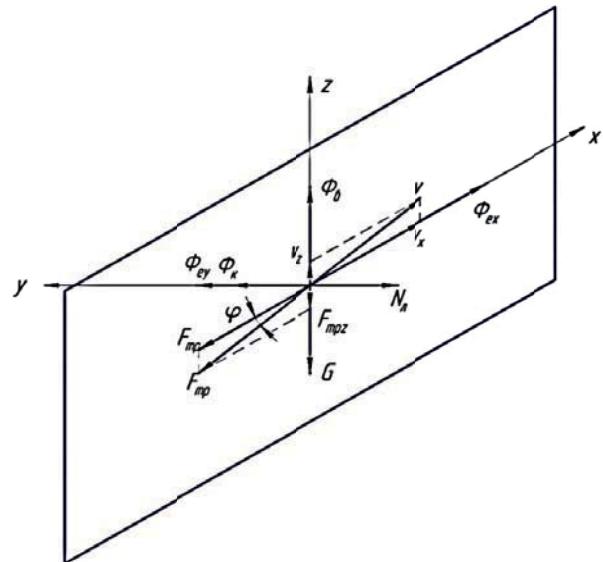


Рис. 4 – Схема сил, действующих на частицу пивной дробины на лопасти ротора при осевой вибрации

$F_{mpz}$  – проекция силы трения в направлении оси  $z$ ,  $N_a$ ;

$G$  – сила тяжести, Н.

Вибрационная сила инерции, сила трения, сила тяжести и нормальная реакция лопасти  $N_a$  равны:

$$\Phi_e = m \cdot A_k \cdot \omega_k^2 \cdot \sin(\omega_k t); \quad (25)$$

$$F_{mpz} = F_{mp} \cdot \sin \varphi = f \cdot N_a \cdot \sin \varphi; \quad (26)$$

$$N_a = \Phi_{ey} + \Phi_k = Fr \cdot g; \quad (27)$$

$$G = m \cdot g. \quad (28)$$

С учётом выражений (25–28) и сокращая массу, уравнение (24) можно записать как:

$$A_k \cdot \omega_k^2 > g \cdot (f \cdot Fr + 1). \quad (29)$$

Из уравнения (29) получим условия для определения значений амплитуды  $A_k$  и частоты колебаний  $\omega_k$  ротора, при которых частица пивной дробины от вибрационных возмущений начнёт колебаться:

$$A_k > \frac{g \cdot (f \cdot Fr + 1)}{\omega_k^2}; \quad (30)$$

$$\omega_k > \sqrt{\frac{g \cdot (f \cdot Fr + 1)}{A_k}}. \quad (31)$$

Соблюдение условий (30) и (31) позволяет задаться необходимыми минимальными значениями параметров вибрации для эффективного разделения пивной дробины.

#### Выводы.

1. Обосновано применение дифференциации (распределения) потока супензии пивной дробины в процессе разделения на жидкую и густую фракции и создание равнотолщинного слоя фильтруемого материала по всей поверхности перфорированных прямолинейных и криволинейных лопастей, установленных друг за другом по ходу вращения на роторе с осевыми колебаниями.

2. Определены фактор разделения и условия вибрации лопастного ротора, позволяющие задаться необходимыми минимальными значениями основных параметров вибрационно-центробежной центрифуги для эффективного разделения пивной дробины на густую и жидкую фракции.

### **Литература**

1. Кирсанов В.В. Механизация и технология животноводства: учебник / В.В. Кирсанов [и др.]. М.: ИНФРА-М, 2013. 585 с.
2. Рециклинг отходов в АПК: справочник / И.Г. Голубев [и др.]. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2011. 296 с.
3. Батищева Н.В. Инновационные способы утилизации пивной дробины // Научное обозрение. Технические науки. 2016. № 6. С. 10–14.
4. Балашов О.Ю., Утолин В.В., Лузгин Н.Е. Особенности получения прессованных кормов из побочных продуктов пивоваренного производства // Аграрный вестник Верхневолжья. 2018. № 1 (22). С. 50–54.
5. Устройство для обезвоживания пивной дробины : пат. 157095 Рос. Федерация. № 2015129920; заявл. 20.07.2015; опубл. 20.11.2015. Бюл. № 32.
6. Пат. 172014 Рос. Федерация. № 2016124822. Устройство для обезвоживания пивной дробины; заявл. 21.06.2016; опубл. 26.06.2017. Бюл. № 18.
7. Nikolaev V.N., Akmethvaliev M.S., Litaš A.V. Результаты экспериментальных исследований вибрационно-центробежной установки для разделения пивной дробины // Аграрный вестник Урала. 2017. № 4 (158). С. 57–61.
8. Akmethvaliev M.S., Nikolaev V.N., Litaš A.V. Теоретическое определение выхода жидкой фракции пивной дробины в вибрационно-центробежной центрифуге // Аграрный вестник Урала. 2017. № 8 (162). С. 56–59.
9. Sokolov V.I. Современные промышленные центрифуги. М.: Машиностроение, 1967. 523 с.
10. Darhanov A.I. Разработка и обоснование основных параметров вибрационно-центробежной установки для разделения пивной дробины на жидкую и густую фракции: дис. ... канд. техн. наук. Челябинск, 1994. 167 с.
11. Sokolov V.I. Современные методы разделения суспензий и эмульсий // Журнал Менделеевского общества. 1965. № 1. 34–43 с.