

## Разработка математической модели криоизмельчения отходов агропромышленного комплекса

*С.В. Кишкилёв, аспирант, В.Г. Коротков, д.т.н., профессор, В.П. Попов, к.т.н., ФГБОУ ВО Оренбургский ГУ*

Актуальной задачей технологических процессов измельчения является снижение его энергоёмкости.

Перспективным и эффективным решением данной задачи следует назвать применение глубокой заморозки зернового сырья. Несмотря на многие очевидные и значительные преимущества такого способа, на предприятиях производства кормов и кормовых добавок продолжают господствовать традиционные методы. Анализ литературных сведений позволяет сделать вывод, что такое положение дел обусловлено рядом причин, важнейшими из которых являются отсутствие необходимого технологического оборудования, а также недостаточный уровень научно-технических разработок в этом направлении.

**Цель исследования** – разработка математической модели процесса измельчения с применением глубокой заморозки зернового сырья. Это включает в себя разработку общего методологического подхода к исследованию и применению глубокой заморозки, создание теоретических моделей на основе общего методологического подхода для определения характеристик и показателей процесса и установок такого назначения, определение и исследование закономерностей обработки таким методом, разработку рекомендаций для реализации криоизмельчения в условиях предприятий комбикормовой промышленности.

При проектировании процессов ударно-истирающего измельчения удобно применять математическое моделирование, позволяющее выполнять параметрический синтез оптимального объекта [1]. Оптимизация объекта исследования – процесса измельчения зерна в дробилке при различной величине давления воздуха в рабочей камере производится по комплексу параметров эффекта, т.е. параметров, характеризующих потребительские качества продукта и ресурсосбережение применяемой технологии.

В ранее опубликованных авторами работах была предложена математическая модель процесса измельчения зернового материала в дробилке ударно-

истирающего действия, представляющей роторный измельчитель с вертикальным расположением вала ротора [2]. Математическая модель процесса измельчения зерна была получена как для бесситовых, так и для решётных зернодробилок [2, 3]. При описании математической модели авторами за основу была положена теорема Эйлера о сумме моментов в замкнутой системе [4, 5].

При функционировании измельчителя только часть энергии тратится на полезную работу. По данным исследователей, степень измельчения зависит от мощности, которая пошла на измельчение. Величину мощности затрачиваемой непосредственно на процессы измельчения определим из баланса мощностей.

Уравнение баланса мощности сил имеет вид:

$$N_2 + N_a = N_c + N_{из} + N_{2сл} + N_{3сл}, \quad (1)$$

где  $N_2$  – мощность, передаваемая ротором непосредственно воздушно-продуктовому слою, Вт/кг;

$N_a$  – мощность, передаваемая через границу воздушно-продуктового слоя и воздушно-вихревой зоны, Вт/кг;

$N_c$  – мощность, выделяемая воздушно-продуктовым слоем при трении о стенку рабочей камеры измельчителя, Вт/кг;

$N_{из}$  – мощность, затрачиваемая на процессы измельчения, Вт/кг;

$N_{2сл}$  – мощность, идущая на смешивание воздушно-продуктового слоя на участке 2, Вт/кг;

$N_{3сл}$  – мощность, идущая на смешивание воздушно-продуктового слоя на участке 3, Вт/кг.

На основе методик, представленных В.Г. Коротковым, С.В. Кишкилёвым, В.П. Поповым, С.В. Антимоновым, были получены уравнения для определения мощностей на отдельных участках дробилки [1–5].

Мощность, расходуемая на процесс измельчения в рабочей камере измельчителя, может быть определена из выражения:

$$N_i = M_i \cdot \omega_0. \quad (2)$$

Мощность, передаваемая дробилкой непосредственно воздушно-продуктовому слою, равна:

$$N_2 = z_n \xi_{2,n} h_n \frac{\rho_c \omega_0^3 r_a^3}{2} \left( \frac{\psi_1^2 (1 - \bar{r}_{вн}^8)}{8} + \frac{2\psi_1 \psi_2 (1 - \bar{r}_{вн}^7)}{7} + \frac{\psi_2^2 (1 - \bar{r}_{вн}^6)}{6} - \frac{\psi_1 (1 - 5\bar{r}_{вн}^6) + 6\bar{r}_{вн}^5 (1 + \psi_1) + 2\bar{r}_{вн}^2 (4\bar{r}_{вн} + 3) + 1}{15} \right) \quad (3)$$

Мощность, идущая на смешивание воздушно-продуктового слоя на участке 2 равна:

$$N_{2сч} = \xi_{сч} \cdot \rho_c \cdot \omega_0^3 \cdot r_a^2 \left( \frac{\psi_1^2 \cdot \left(\frac{-9}{r_a} - 1\right)}{9} + \frac{\psi_1 \cdot \psi_2 \cdot \left(\frac{-8}{r_a} - 1\right)}{4} + \frac{\psi_2 \cdot \left(\frac{-7}{r_a} - 1\right)}{7} + \frac{\psi_1 \cdot \left(\frac{-6}{r_a} - 1\right)}{3} + \frac{\psi_1^2 \cdot \left(\frac{-6}{r_a} - 1\right)}{8} + \frac{2\psi_1 \psi_2 \cdot \left(\frac{-7}{r_a} - 1\right)}{7} + \frac{\psi_2 \cdot \left(\frac{-6}{r_a} - 1\right)}{6} + \frac{2\psi_1 \cdot \left(\frac{-5}{r_a} - 1\right)}{5} + \frac{2\psi_2 \cdot \left(\frac{-5}{r_a} - 1\right)}{5} + \frac{\bar{r}_{сч}^3 - 1}{3} - \frac{z_n - F_z}{2} \left( \frac{\psi_1^2 \cdot \left(\frac{-6}{r_a} - 1\right)}{8} + \frac{2\psi_1 \psi_2 \cdot \left(\frac{-7}{r_a} - 1\right)}{7} + \frac{\psi_2 \cdot \left(\frac{-6}{r_a} - 1\right)}{6} + \frac{2\psi_1 \cdot \left(\frac{-5}{r_a} - 1\right)}{5} + \frac{\psi_2 \cdot \left(\frac{-4}{r_a} - 1\right)}{2} + \frac{\bar{r}_{сч}^2 - 1}{2} \right) \right) \cdot \pi H r_a \quad (4)$$

Мощность, идущая на смешивание воздушно-продуктового слоя на участке, равна:

$$N_{3сч} = \xi_{сч} \cdot \rho_c \cdot H \cdot \omega_0^3 \cdot r_a^2 \left( \frac{\psi_1 \cdot \left(\frac{-10}{r_{сч}} - r^{-10}\right)}{10} + \frac{2\psi_1 \cdot \psi_2 \cdot \left(\frac{-9}{r_a} - r^{-9}\right)}{9} + \frac{\psi_2 \cdot \left(\frac{-8}{r_a} - r^{-8}\right)}{8} + \frac{2\psi_1 \cdot \psi_2 \cdot \left(\frac{-7}{r_{сч}} - r^{-7}\right)}{7} + \frac{\psi_2 \cdot \left(\frac{-6}{r_a} - r^{-6}\right)}{3} + \frac{\bar{r}_{сч}^{-4} - r^{-4}}{4} \right) \quad (5)$$

Мощность  $N_a$  определяется с помощью уравнения:

$$N_a = -2\pi c \omega_0^2 H r_a^2 (3\psi_1 + 2\psi_2) \quad (6)$$

Мощность сил трения о стенку рабочей камеры можно определить по выражению:

$$N_c = M_c \frac{v_c}{r_c} \quad (7)$$

Окончательно выражение определения мощности сил трения о стенку рабочей камеры примет вид:

$$N_c = 2\tau_c \sqrt{\frac{\pi H P_{из} r_{из}}{\xi_c \rho_c}} \quad (8)$$

Уравнение для мощности, затрачиваемой на измельчение, получим из уравнения:

$$N_{из} = N_c + N_{2сч} + N_{3сч} - N_2 - N_a \quad (9)$$

Таким образом, мощность, затрачиваемая на измельчение, зависит от мощности, передаваемой ротором непосредственно воздушно-продуктовому слою ( $N_{2сч}$ ), мощности, выделяемой воздушно-продуктовым слоем при трении о стенку рабочей

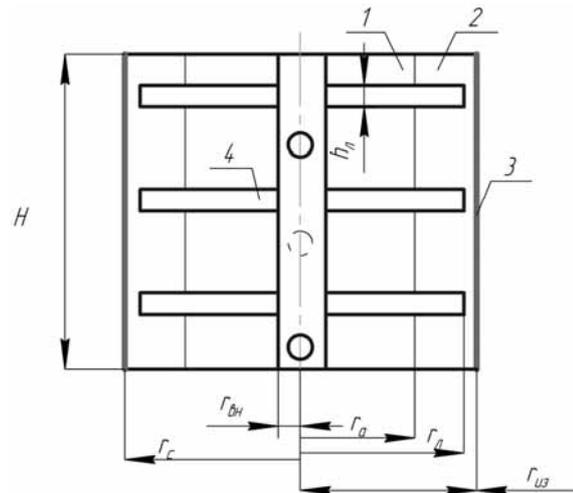


Рис. – Структура рабочего пространства измельчителя вертикального типа:

1 – воздушно-вихревая зона; 2 – воздушно-продуктовый слой; 3 – обечайка; 4 – лопасть рабочего органа

камеры измельчителя, мощности, затрачиваемой на смешивание воздушно-продуктового слоя на участке 2 (рис.), идущей на смешивание воздушно-продуктового слоя на участке 3 (рис.).

Результаты исследования позволяют сделать вывод о том, что снижение величины мощности непосредственно в воздушно-продуктовом слое и мощности, передаваемой через границу воздушно-продуктового слоя и воздушно-вихревой зоны, а также увеличение мощности, выделяемой воздушно-продуктовым слоем при трении о стенку рабочей камеры измельчителя, мощности, идущей на смешивание воздушно-продуктового слоя, приведёт к увеличению мощности измельчения и, как следствие, к более интенсивному измельчению продукта.

### Литература

1. Коротков В.Г. Измельчение и охлаждение сырья при получении экструдированных кормов и добавок / В.Г. Коротков, С.В. Кишкилев, С.В. Антимонов, В.П. Попов // Хранение и переработка сельхозсырья. 2013. № 3. С. 17–20.
2. Кишкилёв С.В. Разработка технологии экструдированных кормов на основе отходов пищевой промышленности с охлаждением двукратно измельчаемого сырья / С.В. Кишкилёв, В.П. Попов, В.Г. Коротков, С.В. Антимонов // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры: матер. Всерос. науч.-методич. конф. (с международным участием). М., 2013. С. 978–981.
3. Коротков В.Г., Кишкилёв С.В., Кобылкин Д.С. Повышение качества и эффективности переработки зернового сырья с применением криогенных технологий // Хранение и переработка сельхозсырья. 2015. № 6. С. 17–21.
4. Кишкилев С.В., Тимофеева Д.В., Мартынов Н.Н. Исследование переработки зернового сырья на технологической линии при применении криогенных технологий // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры: матер. Всерос. науч.-методич. конф. (с международным участием). М., 2015. С. 939–947.
5. Кобылкин Д.С. Измельчение под вакуумом в технологии получения экструдированных кормосмесей и добавок / Д.С. Кобылкин, С.В. Антимонов, В.Г. Коротков, Е.В. Ганин // Хранение и переработка сельхозсырья. 2008. № 6. С. 27–29.