

УДК 631.363.001.66

В. А. ШАРШУНОВ¹, А. В. ЧЕРВЯКОВ², О. В. ПОНТАЛЕВ²

ВЫБОР КОНСТРУКЦИИ И ПАРАМЕТРОВ ЭКСПАНДЕРА ДЛЯ ОБРАБОТКИ ЗЕРНА И ЕГО СМЕСЕЙ С НЕТРАДИЦИОННЫМ СЫРЬЕМ

¹ Могилевский государственный университет продовольствия,

² Белорусская государственная сельскохозяйственная академия

(Поступила в редакцию 22.03.2007)

Углубленная переработка фуражного зерна для кормления свиней, крупного рогатого скота и птицы является общепризнанным направлением в производстве комбикормов для животноводства. «Взрыв» зерна при экспандировании, за счет комбинированного воздействия давления и температуры, обеспечивает увеличение переваримости питательных веществ на 10–15% с влажностью материала до 26%, что позволяет использовать пудрет в качестве добавки в смесь с зерном [1].

Плохие технологические качества пудрета (способность к налипанию на рабочие детали обрабатывающих машин) не позволяют осуществлять его обработку в естественном виде на экспандере. В имеющихся рекомендациях по кормлению сельскохозяйственных животных установлено, что максимальное процентное включение пудрета в смеси с зерновыми компонентами не должно превышать 30%. Поисковыми опытами в БГСХА установлено, что такое соотношение пудрета с фуражным зерном обеспечивает устойчивый режим обработки получаемой смеси без налипания материала на детали экспандера [2].

В существующих конструкциях экструдеров и экспандеров применяется пассивная одно- и многоканальная матрица, закрепленная неподвижно в корпусе самого экспандера и позволяющая получить конечный продукт цилиндрической формы с взорванной микропористой внутренней структурой после достижения давления прессования 2,3 МПа и температуры 180–200 °С. Недостатком применения пассивных матриц является ограниченная возможность увеличения площади проходного сечения матрицы выше предельно допустимых уровней, необходимых для обеспечения теплового взрыва зерна на ее выходе. Увеличение же числа каналов до 2 и выше приводит к значительному усложнению конструкции экспандера.

В БГСХА предложена новая конструкция матрицы (рис. 1), включающая корпус экспандера 11 и формующий элемент 22, установленный неподвижно на валу шнека 15 экспандера, а следовательно, и вращающейся вместе с ним относительно корпуса [3].

При этом экспандирование кормовых смесей на исследуемом экспандере происходит в кольцевом зазоре между корпусом и боковой поверхностью формующего элемента матрицы. Кольцевой зазор в пределах 3,5–4,5 мм путем изменения диаметров формующего элемента и корпуса позволяет увеличивать площадь живого сечения матрицы, что обеспечивает эффективное экспандирование зерна и его смесей и не ограничивает возможность повышения производительности рассматриваемого процесса в больших пределах, чем у экспандеров традиционной конструкции. Вращение формующего элемента матрицы вместе со шнеком позволяет уменьшить коэффициент трения о поверхность, что, в свою очередь, снижает давление прессования на осуществление процесса экспандирования смеси и приводит к уменьшению энергозатрат на сам рабочий процесс.

Анализ результатов теоретических исследований позволяет сделать вывод, что производительность экспандера зависит от свойств обрабатываемого материала, подачи шнека и пропускной

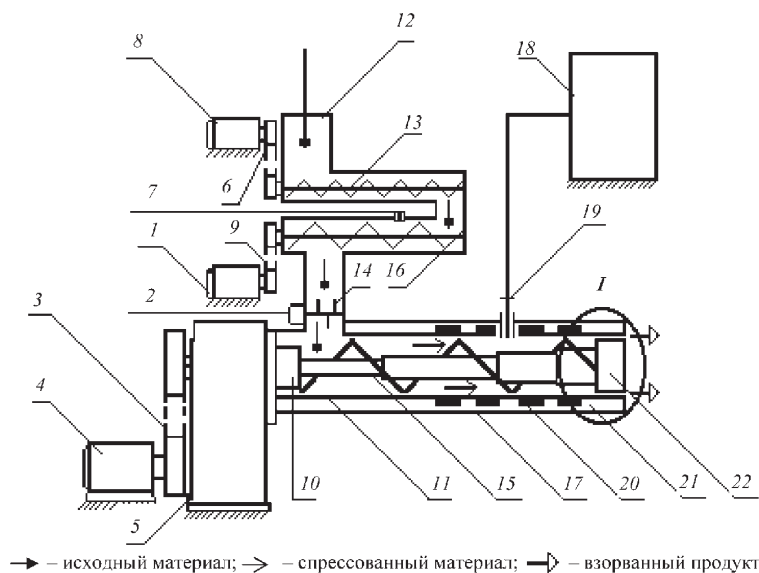


Рис. 1. Схема экспандера: 1 – привод смесителя-дозатора; 2 – привод ворошителя; 3, 6, 9 – клиноременные передачи; 4 – привод шнека; 5 – редуктор; 7 – форсунка; 8 – привод питателя; 10 – соединительная муфта; 11 – корпус камеры шнека; 12 – загрузочный бункер; 13 – питатель; 14 – ворошитель; 15 – шнек; 16 – смеситель-дозатор; 17 – защитный кожух; 18 – шкаф управления; 19 – измерительный преобразователь температуры; 20 – кольцевые нагревательные элементы; 21 – теплоизолятор; 22 – формующий элемент активной матрицы

способности матрицы, которая, по рекомендациям Н. П. Черняева и Г. М. Медведева, характеризуется коэффициентом «живого» сечения [4]. На его величину оказывает влияние кольцевой зазор между боковой поверхностью формующего элемента и корпусом шнека.

Производительность экспандера определяется следующим выражением (рис. 2, а):

$$Q_3 = 900\pi \left(\frac{(\pi f)^2 - k_{\text{ш}}^2}{(\pi f k_{\text{ш}})^2} \right) H^3 \gamma_1 K_{\text{н}} n \left(\frac{4j'(D_{\text{к}} - j')}{D_{\text{к}}^2} \right) k_{\text{м}}, \text{ т/ч}, \quad (1)$$

где f – коэффициент трения обрабатываемой смеси в зоне загрузки шнека; $k_{\text{ш}}$ – конструктивный коэффициент, характеризующий отношение шага витка шнека к его наружному диаметру; H – шаг витка шнека, м; γ_1 – объемная масса смеси в зоне загрузки шнека, т/м³; $K_{\text{н}}$ – коэффициент заполнения межвиткового пространства шнека в зоне загрузки; n – частота вращения шнека, с⁻¹; j – кольцевой зазор между боковой поверхностью формующего элемента активной матрицы и корпусом шнека, м; $D_{\text{к}}$ – диаметр корпуса шнека, м; $k_{\text{м}}$ – коэффициент, учитывающий изменение пропускной способности матрицы в зависимости от свойств обрабатываемого материала.

Значение конструктивного коэффициента $k_{\text{ш}}$ В. А. Силиным рекомендуется принимать в пределах 0,5–1,0. Шаг H и коэффициент заполнения $K_{\text{н}}$ зависят от эквивалентного диаметра обрабатываемых частиц (физико-механических свойств смеси), оптимальное значение данных параметров определяли по методике, предложенной В. А. Силиным [5].

Коэффициент $K_{\text{н}}$ заполнения межвиткового пространства шнека в зоне загрузки равен

$$K_{\text{н}} = \frac{w d_3^2}{6Hh(d+h)} \quad (2)$$

где w – количество частиц смеси в межвитковом пространстве в зоне загрузки шнека, шт; d_3 – эквивалентный диаметр обрабатываемых частиц; h – высота витка шнека в зоне загрузки, м; d – диаметр вала шнека в зоне загрузки, м.

Зависимость коэффициента заполнения от эквивалентного диаметра обрабатываемых частиц и конструктивных параметров шнека – высоты витка (рис. 3, а), шага (рис. 3, б) в зоне загрузки.

Конструктивные параметры шнека – высота витка и диаметр вала – в зоне загрузки определяли в зависимости от физико-механических свойств смеси (коэффициента трения обрабатываемого материала) и шага.

Высота витка будет следующая:

$$h = \frac{H(\pi f - k_{ш})}{2\pi k_{ш}}, \text{ м.} \quad (3)$$

Эффективность подачи обрабатываемой смеси из зоны загрузки в предматричную зону шнековым рабочим органом обеспечивается рациональным выбором угла подъема винтовой линии лопасти шнека, зависящим от шага витка, диаметра вала и коэффициента трения смеси. Тогда, учитывая вышеизложенное, диаметр d вала шнека в зоне загрузки определяется из условия $d = H/\pi f$. Графический анализ зависимостей высоты витка h и диаметра вала d от шага H и эквивалентного диаметра частиц d_3 представлен на рис. 4, 5.

Стабильность протекания процесса экспандирования, а следовательно, и качество полученного продукта зависит не только от кольцевого зазора между поверхностью формующего элемента активной матрицы и корпусом шнека, но и от длины его боковой поверхности, определение которой проводилось по методике, предложенной А. Я. Соколовым (рис. 2, б) [6].

Распределение давления по длине канала, образованного боковыми поверхностями формующего элемента и корпусом шнека, через который проходит материал до завершения релаксационных процессов, возникающих в результате термодинамического воздействия температуры и давления, определяется формулой [7]:

$$p_{L_a} = pe^{-\frac{k_{\sigma} f_2 \Pi L_a}{S_a}}, \quad (4)$$

где p – давление прессования в начале канала активной матрицы, Па; k_{σ} – коэффициент бокового давления в канале активной матрицы; f_2 – коэффициент трения смеси о боковые поверхности канала активной матрицы; Π – периметр сечения канала активной матрицы, м; L_a – длина формующего элемента активной матрицы, м; S_a – площадь проходного сечения канала активной матрицы, м².

Площадь проходного сечения канала активной матрицы равна

$$S_a = \frac{\pi(D_k^2 - d_a^2)}{4}, \text{ м}^2, \quad (5)$$

где d_a – диаметр формующего элемента активной матрицы.

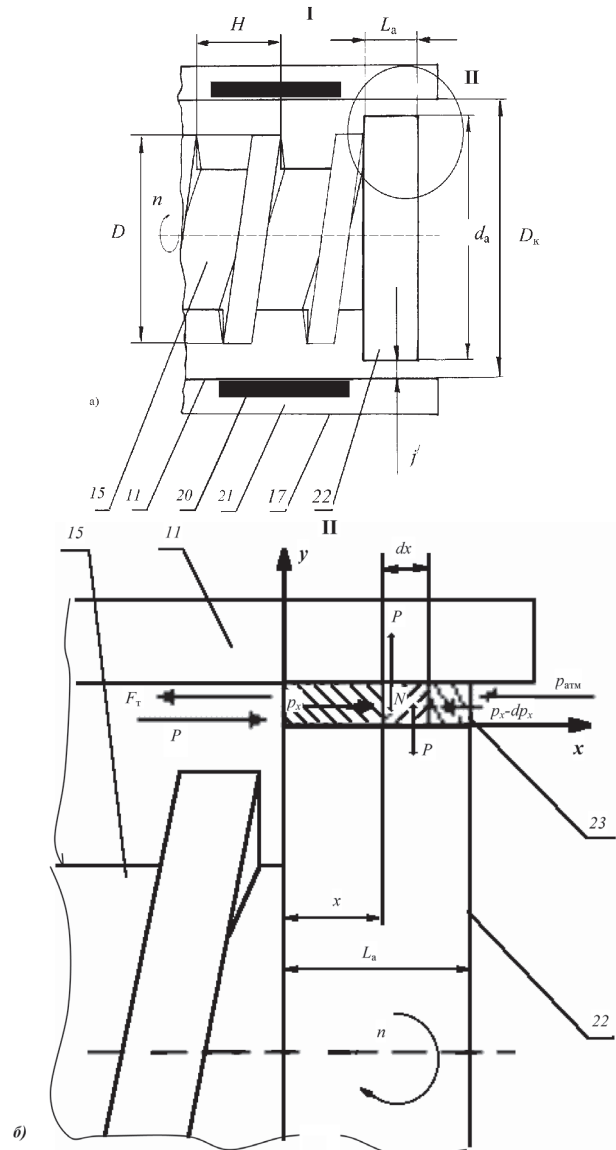


Рис. 2. Элемент конструкции рабочего органа экспандера: а – к расчету производительности; б – схема сил, действующих на выделенный элемент смеси; 11 – корпус камеры шнека; 15 – шнек; 17 – защитный кожух; 20 – кольцевые нагревательные элементы; 21 – теплоизолятор; 22 – формующий элемент активной матрицы; 23 – обрабатываемая смесь; D – наружный диаметр шнека, м; D_k – диаметр корпуса шнека, м; d_a – диаметр активной матрицы, м; j – кольцевой зазор между боковой поверхностью формующего элемента активной матрицы и корпусом шнека, м; H – шаг витка шнека, м; n – частота вращения шнека, с⁻¹; $F_{тр}$ – сила трения, действующая в горизонтальной плоскости, Н; p – давление прессования в начале канала активной матрицы, Па; p_x – давление на выделенный элемент смеси, Па; p_n – сила нормального давления, Н; N – сила нормальной реакции, Н; $p_{атм}$ – атмосферное давление, Па; dp_x – потери давления на внутреннее трение, Па; dx – выделенный элемент смеси, м; x – расстояние от начала координат до выделенного элемента смеси, м; L_a – длина формующего элемента активной матрицы, м

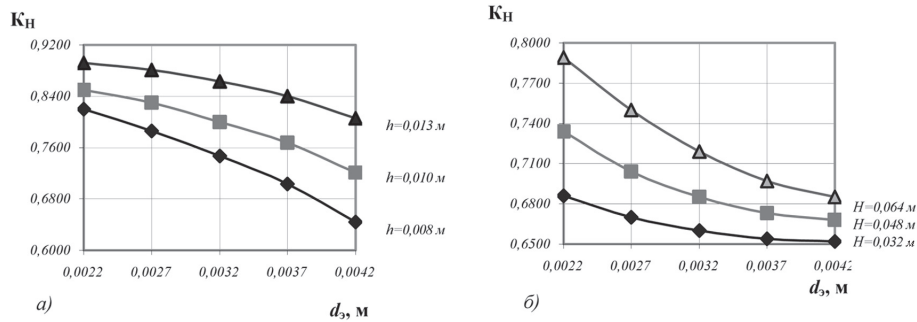


Рис. 3. Зависимость коэффициента заполнения от эквивалентного диаметра частиц и высоты витка шнека в зоне загрузки (а); от эквивалентного диаметра частиц и шага витка шнека в зоне загрузки (б)

Учитывая величину зазора, получаем

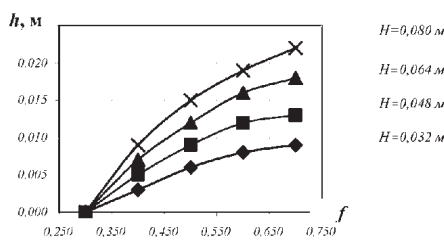


Рис. 4. Зависимость высоты витка от коэффициента трения смеси и шага

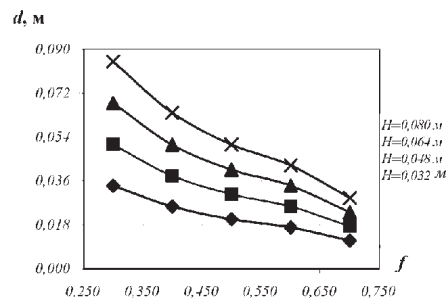


Рис. 5. Зависимость диаметра вала от коэффициента трения смеси и шага

$$S_a = \pi j' (D_k - j'), \text{ м}^2. \quad (6)$$

С учетом выражения (6) и значения периметра Π , равного $2 \cdot (L_a + j')$, формула (4) примет следующий вид:

$$p_{L_a} = pe \frac{2k_{\sigma} f_2 L_a (L_a + j')}{\pi j' (D_k - j')}, \text{ Па}. \quad (7)$$

Уравнение, полученное в результате решения зависимости (7), позволяет определить длину формирующего элемента L_a активной матрицы, превышение которой приводит к тому, что продукт прекращает осевое движение и остается неподвижным относительно камеры шнека. Длина формирующего элемента выражается зависимостью

$$L_a = -\frac{j'}{2} + \sqrt{\frac{(j')^2}{4} - \frac{\pi j' (D_k - j') \ln \frac{p_{\text{атм}}}{p}}{2 \cdot k_{\sigma} \cdot f_2}}, \text{ м}, \quad (8)$$

где $p_{\text{атм}}$ – атмосферное давление, Па.

Графический анализ зависимостей (1) и (8) представлен на рис. 6, 7.

На основании априорной информации и теоретических исследований выбраны факторы, оказывающие наиболее существенное влияние на технологический процесс, и определены границы их варьирования.

На этапе лабораторных исследований значимыми факторами являлись следующие: высота витка в зоне загрузки – 0,0072–0,0183 м; диаметр и длина формирующего элемента активной матрицы – 0,036–0,096 и 0,030–0,088 м соответственно; частота вращения шнека – от 0,8 с⁻¹; температура нагрева рабочей камеры шнека – 100–220 °С; влажность обрабатываемой смеси –

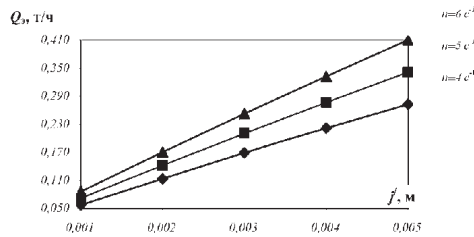


Рис. 6. Зависимость производительности экспандера от величины кольцевого зазора при различной частоте вращения рабочего органа

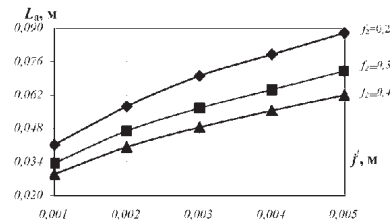


Рис. 7. Зависимость длины формирующего элемента от величины кольцевого зазора и коэффициента трения смеси о боковые поверхности канала активной матрицы

21,8–39,6%. Оптимизацию данных факторов проводили на основании значения коэффициента взорванности полученного продукта (k_B) и величины энергозатрат (Θ).

Лабораторные исследования проводили на кафедре «Механизация животноводства и электрификация сельскохозяйственного производства» БГСХА.

В ходе поисковых экспериментов были уточнены границы варьирования факторов, выделенных на этапе лабораторных исследований: диаметр d_a и длина L_a формирующего элемента активной матрицы 0,056–0,071 и 0,04–0,08 м соответственно; высота шнека в зоне загрузки h – 0,008–0,013 м; частота вращения шнека n – 3,3–5,0 c^{-1} ; температура нагрева камеры шнека T – 165–210 $^{\circ}C$; влажность исследуемого материала W – 21,8–29,3%.

Производственные испытания экспандера с активной матрицей проводили с мая 2003 г. по сентябрь 2005 г. на базе РСУПП «Птицефабрика Оршанская» с целью уточнения конструктивных параметров и технологических режимов обработки смеси ячменя и пудрета. Экспериментальное оборудование было установлено в линию обработки зерна для получения продукта, используемого в дальнейшем в производстве комбикормов.

Задача данных испытаний – определение рациональных режимов обработки смеси из зерна ячменя и пудрета на основании качественных показателей получаемого продукта и удельной энергоёмкости процесса; оценка эффективности работы установки.

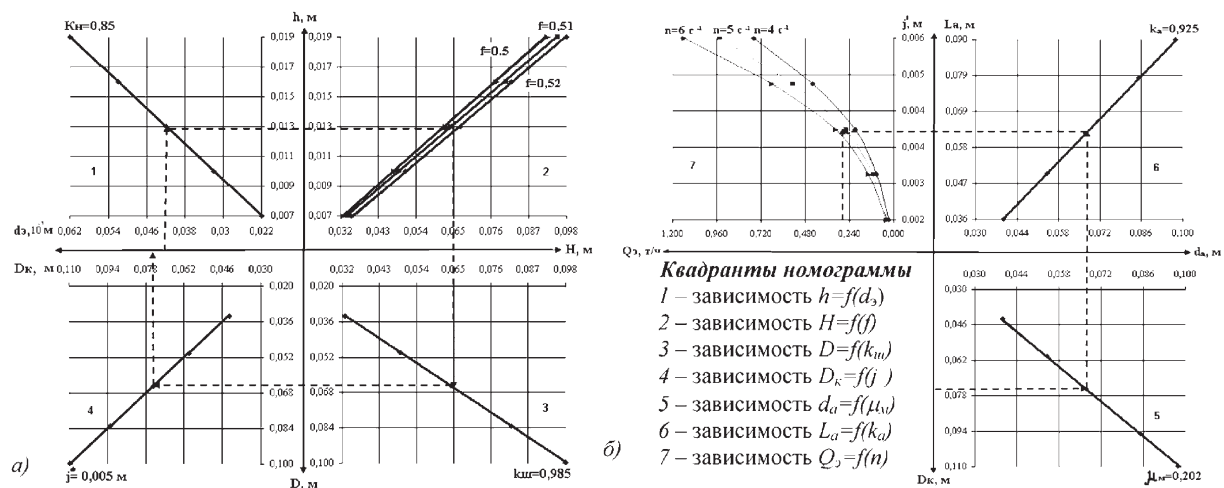


Рис. 8. Номограмма для выбора конструктивных параметров экспандера: *a* – выбор параметров шнека; *б* – выбор параметров активной матрицы; Q_3 – производительность экспандера, т/ч; N – частота вращения шнека, c^{-1} ; $k_{ш}$ – конструктивный коэффициент шнека; k_a – конструктивный коэффициент активной матрицы; μ_m – коэффициент живого сечения активной матрицы; L_a – длина формирующего элемента активной матрицы, м; D_k – диаметр корпуса шнека, м; D – наружный диаметр шнека, м; j'' – зазор между шнеком и его корпусом, м; j' – кольцевой зазор между боковой поверхностью формирующего элемента активной матрицы и корпусом шнека, м; h и H – высота и шаг витка шнека соответственно, м; f – коэффициент трения смеси в зоне загрузки; d_s – эквивалентный диаметр обрабатываемой частицы, м; K_H – коэффициент заполнения витка в зоне загрузки

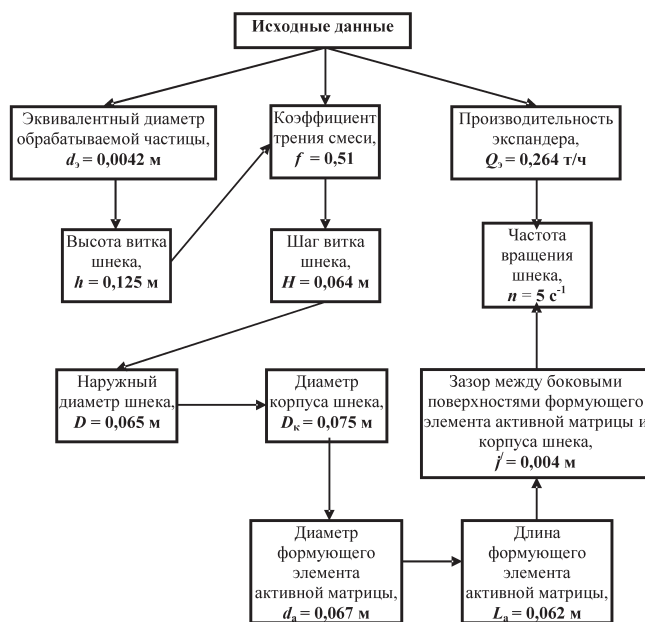


Рис. 9. Алгоритм выбора параметров экспандера

В ходе производственных испытаний по общепринятым методикам определяли суммарную мощность оборудования $\Sigma N = 20$ кВт. Производительность экспандера оценивали по выходу конечного продукта $Q_s = 0,264$ т/ч. На основании этого рассчитывали удельную энергоёмкость процесса $\Xi = 64$ кВт·ч/т. Качественные показатели продукта изучали с стандартных методик в лаборатории Института экспериментальной ботаники им. В. Ф. Купревича НАН Беларуси. Бактериологические исследования по определению в полученном продукте вредной микрофлоры проводили в ветеринарной лаборатории г. Костюковичи.

Анализ полученных результатов показал, что для достижения необходимых качественных показателей конечного продукта с обеспечением минимальных удельных энергозатрат необходимо иметь следующие рациональные конструктивные

параметры и технологические режимы обработки: диаметр и длина формующего элемента активной матрицы – 0,060–0,065 м и 0,066–0,068 м соответственно (при диаметре корпуса шнека – 0,075 м); частота вращения шнека – 4,7–5,0 с⁻¹; температура нагрева камеры шнека – 180–200 °С; влажность обрабатываемой смеси – 23–25%.

На основании результатов теоретических и экспериментальных исследований разработана методика расчета шнека и активной матрицы экспандера, основанная на определении значений следующих параметров: наружного диаметра шнека, м; высоты и шага витка в зоне загрузки шнека, м; диаметра корпуса шнека, м; кольцевого зазора между боковой поверхностью формующего элемента активной матрицы и корпусом шнека, м; длины и диаметра формующего элемента активной матрицы, м; частоты вращения шнека экспандера, с⁻¹.

При расчете вышеуказанных параметров в качестве исходных данных использовали определенные экспериментальным путем физико-механические свойства обрабатываемого материала (коэффициент трения смеси в зоне загрузки и эквивалентный диаметр обрабатываемых частиц), а также производительность установки по конечному продукту.

Результаты теоретических, экспериментальных исследований и производственных испытаний позволили для упрощения выбора конструктивных параметров шнека и активной матрицы разработать номограмму (рис. 8).

Порядок выбора параметров экспандера для известных характеристик физико-механических свойств смеси можно представить в виде алгоритма (рис. 9).

Выводы

1. Использование экспандера с активной матрицей для обработки смесей фуражного зерна и пудрета уменьшает энергозатраты производства единицы продукции на 45–52% при устойчивом технологическом процессе экспандирования, обеспечив требуемое качество полученного продукта.

2. Непрерывность протекания процесса экспандирования с величиной удельных энергозатрат 60–65 кВт·ч/т и полным уничтожением вредной микрофлоры в полученном продукте до-

стигается при оптимальном значении выбранных факторов: диаметре формующего элемента активной матрицы – 0,066–0,068 м; влажности обрабатываемой смеси – 23–25%; температуре нагрева камеры шнека – 180–200 °С.

3. Разработанная методика расчета конструктивных параметров и эксплуатационных режимов работы оборудования, в зависимости от физико-механических свойств обрабатываемого материала, позволяет обоснованно выбрать для установок с производительностью до 1,13 т/ч высоту и шаг витка в зоне загрузки; наружный диаметр и частоту вращения шнека; диаметр корпуса шнека; зазор, диаметр и длину формующего элемента активной матрицы.

Литература

1. Шаршунов В. А., Червяков А. В., Курзенков С. В. Состояние и тенденции применения новых ресурсосберегающих технологий при производстве комбикормов. М.: ООО «Девятка Плюс», 2004.

2. Шаршунов В. А., Червяков А. В., Понтелев О. В. Результаты исследований по экспандированию кормовых смесей с включением пудрета // Агропанорама. 2004. № 2. С. 2–5.

3. Экспандер для приготовления кормов: Пат. 3208 Республики Беларусь на полезную модель, А 23 N 17/00. В. А. Шаршунов, А. В. Червяков, С. И. Козлов, О. В. Понталев; заявитель и патентообладатель БГСХА. № 20060046; заявл. 31.01.2006; опубл. 30.12.2006. Бюл. 2004. № 6. С. 161.

4. Черняев Н. П. Технология комбикормового производства. М.: Колос, 1992.

5. Силин В. А. Динамика процессов переработки пластмасс в червячных машинах. М.: Машиностроение, 1972.

6. Соколов А. Я. Основы расчета и конструирования машин и автоматов пищевых производств. М.: Машиностроение, 1973.

V. A. SHARSHUNOV, A. V. CHERVYAKOV, O. V. PONTALEV

SELECTION OF EXPANDER DESIGN AND PARAMETERS FOR PROCESSING GRAIN AND ITS MIXTURES WITH NONTRADITIONAL RAW

Summary

The quality improvement of mixed fodders in modern conditions must be based on the development and presentation of new technologies of deep treatment of mixtures of feed grain and secondary resources of forages, which allow one to considerably increase the efficiency of use of all potential of forages.

The structurally-technological scheme of equipment for moisture heat treatment of mixture of feed grain and secondary resources of forages is presented in the article. Basic advantages of the offered expander desing are given with an active matrix. The methods its is calculation, allowing one on the basis of physical-mechanical properties of the processed mixture to make a selection of structural parameters of a serew and an active matrix, are described.