

УДК 636.086.1.085.6

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАСЧЕТА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ЭКСПАНДИРОВАНИЯ

В.А. ШАРШУНОВ, член-корреспондент ААН РБ; А.В. ЧЕРВЯКОВ, к.т.н.;
С.И. КОЗЛОВ, А.А. РАДЧЕНКО, аспиранты (БСХА)

Ежегодно на предприятиях комбикормовой промышленности и непосредственно в хозяйствах при производстве комбикормов увеличивается доля использования фуражного зерна. Однако для повышения питательной ценности зернового материала его необходимо подвергнуть определенной обработке. В последние годы широкое применение в нашей стране и за рубежом получили методы тепловой и влаготепловой обработки концентратов и зерна: плющение, обжаривание, гранулирование, микронизация, экструзия и другие.

Несомненно, что с ростом цен на зерно и для того, чтобы выдержать конкуренцию, комбикормовые предприятия и хозяйства стремятся изыскивать новые, прогрессивные технологические методы, способствующие улучшению качества комбикормов, требования к которым постоянно повышаются.

Активная работа в этом направлении проводится в БСХА совместно с НПП "Белама Плюс". В качестве альтернативной технологии здесь предлагается так называемая экспансионная обработка зерновых компонентов с помощью специального оборудования - экспандеров.

В отличие от существующих способов влаготепловой обработки новый метод расплющивания зерна с одновременной обработкой его паром имеет ряд достоинств:

- обработка в экспандере уменьшает общую обсеменность сырья. Полностью уничтожаются колиобразные бактерии, кишечная палочка, плесневые грибки и сальмонеллы, крахмал при этом гидролизует, а антипитательные факторы (ингибиторы) расщепляются;
- при использовании экспандера отпадает необходимость постоянного исследования гигиенического стандарта сырьевых материалов, так как получаемая продукция является практически пастеризованной;
- экспандирование корма способствует лучшему состоянию животных из-за более высокого стандарта гигиены, более полной усвояемости крахмала за счет увеличения ввода жира и протеина благодаря уменьшению эндогенных потерь азота в форме ферментов;
- разрушение жирорасщепляющих ферментов при

экспандировании повышает срок хранения продукции и позволяет сохранить их вкусовые качества;

- в отличие от экструдера условия протекания процессов в экспандере более щадящие. Это не отражается ни на содержании аминокислот, ни на их биологической активности;

- водорастворимые витамины, ингибиторы роста при этом не повреждаются, жирорастворимые - в пределах допуска.

С целью изучения процессов, протекающих в экспандере, и их влияние на качественные показатели корма, в БСХА совместно с НПП "Белама плюс" разработано экспериментальное оборудование для экспандирования концентрированных кормов.

Экспериментальное оборудование для экспандирования включает: опытную установку (экспандер) и оборудование для ввода жидких компонентов (воды, жира, обогатительных добавок). Экспандер (рис. 1) состоит из питателя 2 с загрузочным бункером 1, смесителя-дозатора 3, бункера-накопителя 7, рабочего органа (шнека) 5, расположенного в корпусе 4, формующего устройства (матрицы) 9, кольцевых нагревательных элементов 8, закрепленных на корпусе шнека 4, ворошителя 6, приводов: шнека 15, смесителя-дозатора 14, питателя 12, ворошителя 13, клиноремных передач 17, 18, 19, редуктора 16, на верхней части которого и смонтированы все узлы и механизмы. Оборудование для ввода жидких компонентов включает (рис. 1): расходный бак с расходомером 21, плунжерный насос 22 и форсунки 10, 20.

Привод шнека экспандера осуществляется от электродвигателя постоянного тока 5, через клиноремную передачу 19 и редуктор 16. Смеситель-дозатор приводится в движение от электродвигателя постоянного тока 14 посредством клиноремной передачи 18. Привод питателя осуществляется от электродвигателя постоянного тока через клиноремную передачу 17. Ворошитель приводится в движение от однофазного двигателя переменного тока 13.

Регулирование частоты вращения двигателей постоянного тока производится с помощью резисторов, расположенных на панели шкафа управления, контроль

осуществляется с помощью тахометра. Нагрев корпуса шнека производится кольцевыми нагревателями при включении тумблеров на панели шкафа управления. На нагреватели подается напряжение, о чем сигнализируют лампочки, расположенные рядом с тумблерами. Контроль температуры производится по показаниям измерителей температуры, находящихся на панели шкафа управления, датчики 11 которых вмонтированы в корпус шнека 4.

Для обеспечения пропаривания зерносмеси используется вода, которая подается через форсунки 10 в разогретый до заданной температуры корпус шнека 4. Контроль подачи воды производится с помощью расходомера 21.

Главным показателем, характеризующим работу экспандера, является его производительность. Производительность (подача) нагнетающего шнека равна сумме объемов винтовой полости S , заполненных кормом в единицу времени. Если при этом не учитывать многих факторов, влияющих на уменьшение подачи шнеком корма (степень заполнения приемных витков, физико-механических свойств, сопротивление матрицы и др.), то получим теоретическую производительность. Действительная (фактическая) производи-

тельность с учетом этих факторов всегда меньше теоретической.

Теоретическая производительность шнека:

$$Q_T = \omega_{ш} \cdot V \quad (1)$$

или: $Q_T = \omega_{ш} \cdot F_T \cdot S, \quad (2)$

где $\omega_{ш}$ - скорость вращения шнека, c^{-1} ;

F_T - площадь поперечного сечения потока корма, m^2 ;

S - шаг шнека, m .

Площадь поперечного сечения потока корма

$$F_T = F_n - F_b - F_n', \quad (3)$$

где F_n - полная площадь шнека в торцевом сечении, m^2 ;

F_b - площадь вала шнека в торцевом сечении, m^2 ;

F_n' - площадь лопасти шнека в торцевом сечении, m^2 .

Для выражения (1) предполагаем, что кормовая масса плотно заполняет межвитковый объем и перемещается при вращении шнека только поступательно, подобно перемещению твердой гайки по винту без вращения.

При таком предположении кормовая масса продви-

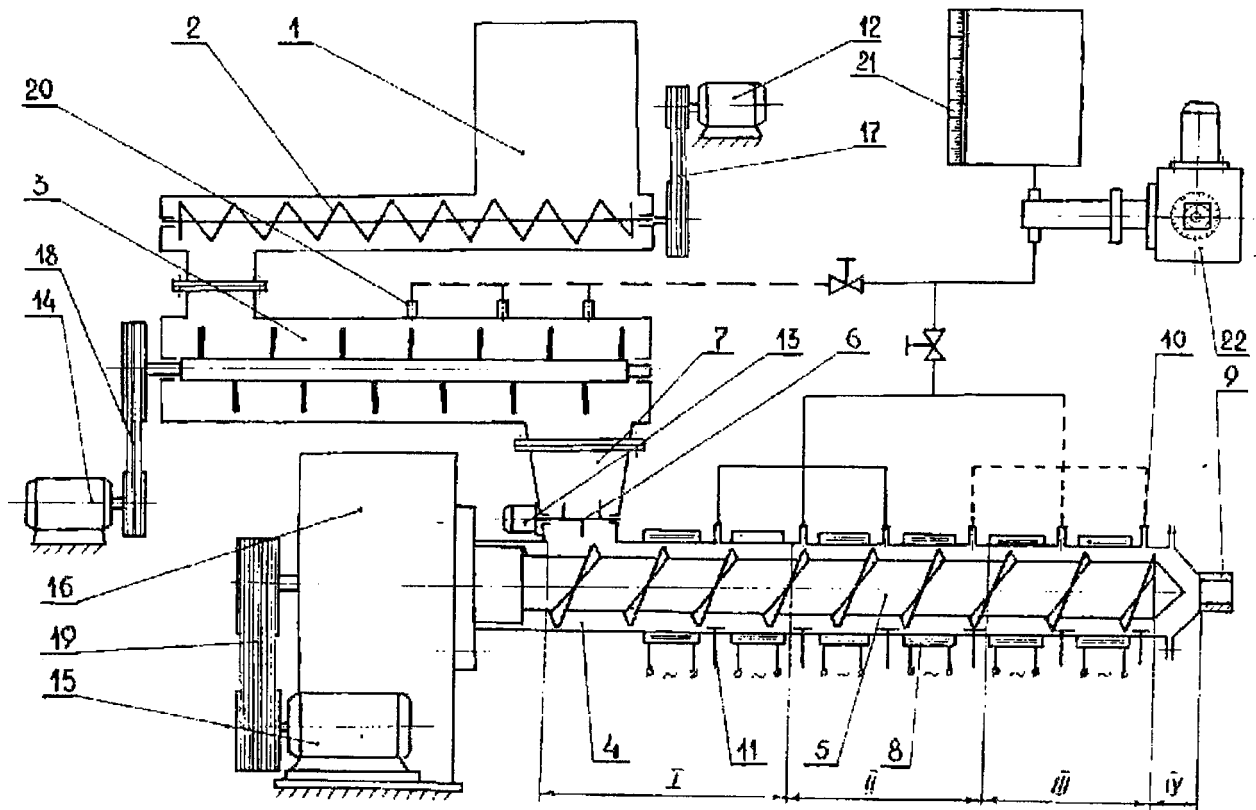


Рис. 1. Технологическая схема экспериментального оборудования:

S - шаг витков шнека, cm ;

a - угол подъема винтовой линии лопасти по среднему диаметру шнека, $rad.$;

$\omega_{ш}$ - скорость вращения шнека, c^{-1} ;

r_2 - объемная масса спрессованного материала (во II зоне), g/cm^3 .

нется вдоль оси шнека за один оборот на длину, равную шагу шнека S .

Выразим значение F_T через параметры шнека и подставим его в выражение (1), а затем после соответствующих преобразований получим теоретическую объемную производительность нагнетающего шнека экспандера

$$Q_T = \pi(R_2^2 - R_1^2) \cdot \left(S - \frac{b_2 + b_1}{2 \cos \alpha}\right) \cdot \omega_{ш} \cdot 60, \text{ см}^3 / \text{ч}. \quad (4)$$

Таким образом, теоретически объемная производительность нагнетающего шнека есть произведение объема винтовой полости длиной S на скорость его вращения.

По выражению (4) можно определить и массовую теоретическую производительность экспандера

$$Q_T = \pi(R_2^2 - R_1^2) \cdot \left(S - \frac{b_2 + b_1}{2 \cos \alpha}\right) \cdot \omega_{ш} \cdot 60 \cdot \frac{\rho_2}{1000}, \text{ кг/ч}, \quad (5)$$

где R_2 и R_1 - наружный и внутренний радиусы шнека, см;

b_2 и b_1 - ширина винтовой лопасти в ее нормальном сечении по наружному и внутреннему радиусам шнека, см.

Анализ формулы (5) показывает, что теоретически возможная производительность пресса линейно изменяется с изменением скорости вращения шнека экспандера. Учитывая влияние сложных явлений, происходящих в шнековой камере при перемещении и прессовании зерновой массы, можно получить формулу фактической производительности нагнетающего шнека.

Процесс перемещения зерновой смеси в рабочей камере характеризуется четырьмя зонами. В первой зоне происходит загрузка материала, интенсивное перемешивание, перемещение вдоль оси шнека и начало уплотнения. Для характеристики работы шнека в этой зоне введем коэффициент наполнения k_n , учитывающий пропорциональную зависимость подачи шнека от степени заполнения объема винтовой полости приемных витков частицами зерновой массы ρ_1 . Вторая зона характеризуется нарастанием давления и прессованием материала с сохранением его сыпучих свойств, однако в этой зоне наиболее выражено относительное проворачивание всей массы относительно шнека, что значительно снижает его пропускную способность. Для характеристики работы шнека во II зоне введем коэффициент k_w и назовем его коэффициентом скольжения. Коэффициент k_w учитывает степень уменьшения подачи прессуемого материала в зависимости от проворачивания ее относительно шнека.

$$K_w = \frac{\omega_{ш} - \omega_m}{\omega_{ш}} = 1 - \frac{\omega_m}{\omega_{ш}}, \quad (6)$$

где $\omega_{ш}$ - скорость вращения шнека, с^{-1} ;
 ω_m - скорость вращения спрессованного материала, с^{-1} .

$$\omega_m = \frac{\omega_{ш} d}{2(D-d)} \sqrt{\frac{f_1 DS - f_2 (dS + (D-d) \cos \alpha)}{D - d(\tan \alpha + \arctg f_2) - 2f_2 (dS + (D-d) \cos \alpha)}}, \quad (7)$$

где f_1 - коэффициент трения между материалом и корпусом шнека;

f_2 - коэффициент трения между материалом и шнеком;

D и d - наружный и внутренний диаметр шнека, м.

Если в формулу теоретической производительности ввести коэффициенты k_n и k_w , то получится формула для определения теоретической пропускной способности экспандера

$$Q_{\Phi}^{(1-11)} = 0.06\pi(R_2^2 - R_1^2) \cdot \left(S - \frac{b_2 + b_1}{2 \cos \alpha}\right) \cdot \omega_{ш} \cdot \rho_2 \cdot k_n \cdot k_w, \quad (8)$$

Для определения объемной массы спрессованного материала в замкнутом объеме воспользуемся эмпирической формулой Ю.А. Мачихина

$$\rho_2 = \left(C + \frac{D}{W_m}\right) \cdot P + B, \text{ г/см}^3, \quad (9)$$

где W_m - влажность материала, %;

P - давление прессования, кг/см^2 ;

C, D, B - эмпирические коэффициенты. При $W_m = 27 \dots 33\%$ и $P > 30 \text{ кг/см}^2$ $C = 112,9 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-1}$, $D = -176,7 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-1}$, $B = 1,373 \text{ г/см}^3$.

Условием стабильной работы экспандера является непрерывность потока материала, транспортируемого шнеком. Исходя из этого, необходимым и достаточным условием является равенство пропускной способности всех четырех зон шнека экспандера.

Рассмотрим на примере формирующих устойчивую работу экспандера первую и вторую рабочие зоны. Пропускная способность каждой из выделенных рабочих зон будет равна:

$$Q_I = \omega_{ш} S_I F \rho_1 k_n, \quad (10)$$

$$Q_{II} = \omega_{ш} S_{II} F \rho_{II} k_w, \quad (11)$$

где ρ_1 и ρ_{II} - объемная масса материала в первой и второй зонах, г/см^3 ;

F - площадь сечения шнека, см^2 ;

S_I и S_{II} - шаг витков шнека в первой и второй зонах, см.

Исходя из условия стабильной работы шнека экспандера, запишем

$$Q_I = Q_{II} \Rightarrow \frac{Q_I}{Q_{II}} = \frac{\omega_m \cdot S_I \cdot F \cdot \rho_1 \cdot k_n}{\omega_{ш} \cdot S_{II} \cdot F \cdot \rho_{II} \cdot k_w} = 1, \quad (12)$$

или

$$\frac{S_I}{S_{II}} = \frac{\rho_{II} \cdot k_w}{\rho_1 \cdot k_n}. \quad (13)$$

Анализ полученного выражения показывает, что шаг витков в зоне прессования должен уменьшаться пропорционально степени увеличения объемной массы с учетом коэффициентов скольжения прессуемого материала во II зоне и коэффициента наполнения материала в I зоне шнека экспандера.

В третьей зоне смесь приобретает вязкопластическое состояние за счет повышения давления и температуры. Величина перемещения зерновой массы определяется пропускной способностью четвертой зоны и главным образом матрицы, которая создает сопротивление.

Для определения пропускной способности матрицы предположим, что материал приобрел вязкопластические свойства и имеет текучесть. Рассмотрим его движение через матрицу 9 (рис.1) с отверстием радиуса R_M как жидкость с повышенной вязкостью η

$$Q_{III-IV} = \frac{\pi R_M^4 (P_{IV} - P_{атм})}{8\eta \ell}, \quad (14)$$

где R_M - радиус отверстия матрицы, м;
 P_{IV} - давление прессования в IV зоне экспандера, Па;
 $P_{атм}$ - атмосферное давление, Па;
 η - вязкость материала, Па·с;

ℓ - длина отверстия канала матрицы, м.

Данное выражение позволяет определить основные параметры матрицы, исходя из условия непрерывности потоков материала в зонах I-II и III-IV

$$Q_{I-II} = Q_{III-IV} \quad (15)$$

Приравняв выражения (8) и (14) и выразив из него $\omega_{ш}$, получим

$$\omega_{ш} = \frac{R_M^4 (P_{IV} - P_{атм})}{480\eta (R_2^2 - R_1^2) \cdot (S - \frac{b_2 + b_1}{2 \cos \alpha}) \cdot \rho_2 \cdot \kappa_{II} \cdot \kappa_{\omega}} \quad (16)$$

Данное выражение позволяет определить частоту вращения шнека от конструктивных параметров рабочего органа при заданной производительности экспандера.

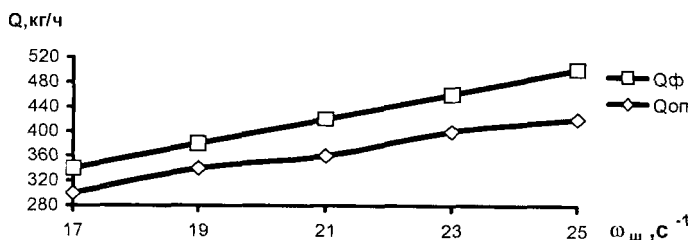


Рис. 2. График зависимости производительности экспандера от частоты вращения шнека.

1. Уровни и интервалы варьирования параметров

Показатели	Влажность, W, %	Температура нагрева, T °C	Частота вращения, ω, c^{-1}	Диаметр отверстия матрицы, $D_M, мм$
Интервал варьирования	2	20	2	5
Нижний уровень	12	120	17	25
Верхний уровень	20	200	25	45

График изменения производительности экспандера от угловой скорости вращения шнека по результатам теоретических и экспериментальных исследований представлен на рис.2.

На экспериментальном оборудовании нами также были проведены эксперименты по определению параметров и их интервалов варьирования по получению качественного продукта.

Для качественного описания процесса экспандирования основным параметром принимаем коэффициент вспученности κ_B , равный

$$\kappa_B = \frac{m_1}{m_2}, \quad (17)$$

где m_1, m_2 - соответственно массы исходного материала и полученного продукта одинакового объема, кг.

Большее значение κ_B соответствует лучшему качеству и, наоборот.

Результаты исследований влияния различных факторов на качественный показатель, которым в нашем случае является коэффициент вспученности κ_B , наглядно можно представить в виде следующих графических зависимостей: $\kappa_B = f(W), \kappa_B = f(T), \kappa_B = f(\omega), \kappa_B = f(D_M)$.

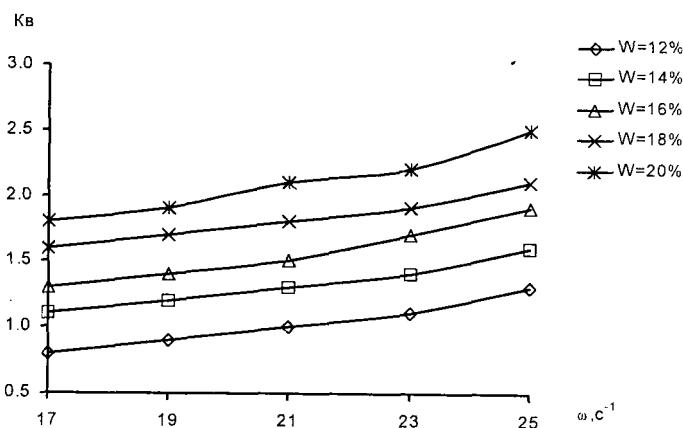


Рис. 3. График зависимости коэффициента вспученности κ_B от частоты вращения шнека ($D_M=25$ мм, $T=200^\circ C$) при исходной влажности зерна W .

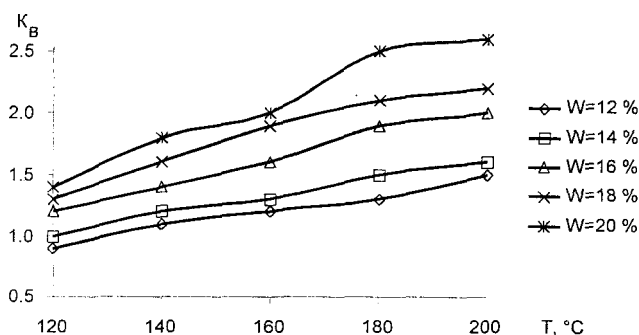


Рис. 4. График зависимости коэффициента вспученности K_b от температуры нагрева корпуса шнековой камеры ($D_m=25$ мм, $n=25$ с-1) при исходной влажности зерна W .

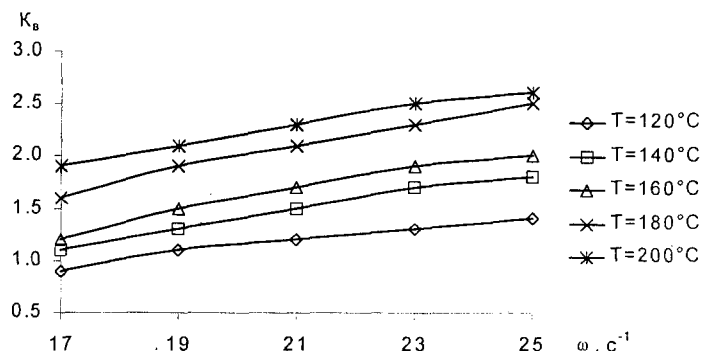


Рис. 5. График зависимости коэффициента вспученности K_b от частоты вращения шнека ($D_m=25$ мм, $W=20\%$) при температуре T корпуса шнековой камеры.

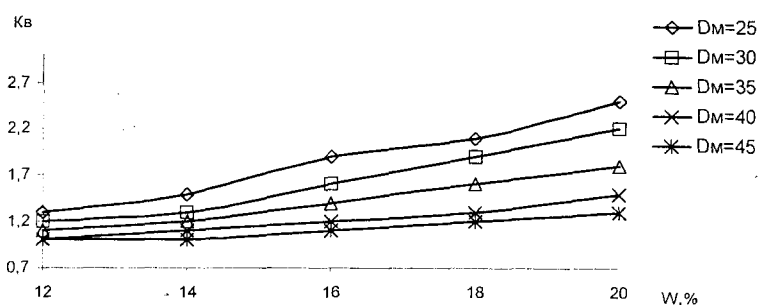


Рис. 6. График зависимости коэффициента вспученности K_b от влажности зерна ($T=200^\circ\text{C}$, $n=25$ с-1) при различных диаметрах матрицы D_m .

Анализ результатов полученных при проведении экспериментов позволят получить следующие наилучшие режимы обработки зернового сырья. Влажность исходного сырья $W=20\%$, температура нагрева корпуса шнека $T=200^\circ\text{C}$, частота вращения шнека $\omega=25$ с⁻¹, при диаметре выходного отверстия матрицы $D_m=25$ мм. При этом коэффициент вспученности получен 2,6.

Литература

1. Шаршунов В. А., Червяков А.В. и др. "Направления совершенствования технологии обработки зерна при производстве комбикормов". Материалы общего собрания Академии аграрных наук Республики Беларусь. - Минск, 1999 г., с. 51-60.
2. Шаршунов В. А. и др. "Проблемы переработки фуражного зерна при производстве комбикормов и пути их решения". Известия БИА. N2, 1999 г., с. 6-9.
3. Трофимов Т.И. Курс физики. М.: Высшая школа, 1990 г.

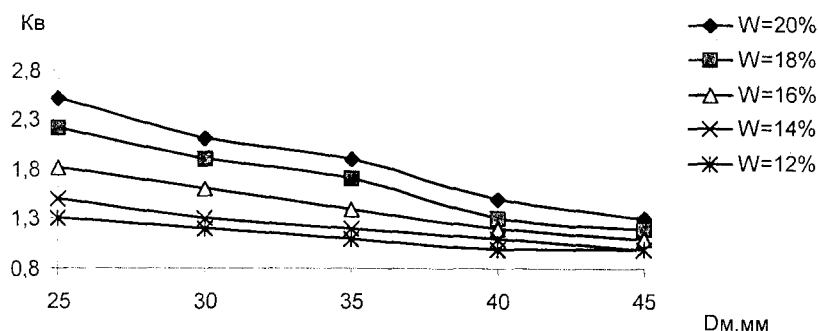


Рис. 7. График зависимости коэффициента вспученности K_b от диаметра формирующего отверстия ($T=200^\circ\text{C}$, $n=25$ с-1) при исходной влажности зерна W .