

УДК 631.363

В. А. ШАРШУНОВ, А. В. ЧЕРВЯКОВ, О. В. ПОНТАЛЕЕВ

**ОБОСНОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ШНЕКОВОГО РАБОЧЕГО ОРГАНА ЭКСПАНДЕРА**

*Могилевский государственный университет продовольствия  
Белорусская государственная сельскохозяйственная академия*

*(Поступила в редакцию 30.06.2004)*

В последние годы в комбикормовой промышленности все большее распространение получает экспандирование зерна с включением различных добавок [1]. Его отличительная особенность от экструдирования состоит в том, что на обработку может быть подан материал с влажностью до 26%. Экструдеры могут обеспечить технологический процесс при обработке исходного сырья только с влажностью до 14—16%. При экспандировании значительно снижаются затраты энергии на рабочий процесс обработки материала, а также обеспечивается более глубокая переработка, как зерновых материалов, так и другого кормового сырья [2]. В БГСХА, совместно с НПП «Белама Плюс», г. Орша Витебской области, разработана новая конструктивно-технологическая схема экспандера с предварительным разогревом исходного материала [3]. Подогрев обеспечивает более стабильный процесс экспандирования кормового сырья при производстве комбикормов из фуражного зерна.

Одним из основных показателей, характеризующим работу экспандера, является его производительность или подача [4]. Производительность шнека экспандера, имеющего цилиндрическую форму (рис. 1), определяется как количество материала, заполняемое в межвитковое пространство в единицу времени. Если не учитывать многих факторов, влияющих на уменьшение подачи шнеком смеси (степень заполнения, физико-механические свойства смеси, сопротивление создаваемое матрицей и др.), то теоретическая объемная производительность шнека экспандера в общем виде равна:

$$Q_m = 60 n V, \text{ м}^3/\text{ч} \quad (1)$$

где  $n$  — частота вращения шнека, об/мин;  $V$  — объем винтовой полости шнека заполненный смесью,  $\text{м}^3$ .

Допустим, что масса обрабатываемой смеси, подаваемая по шнеку, будет полностью заполнять межвитковый объем и перемещаться при вращении шнека только поступательно, подобно осевому движению гайки по винту. При таком движении за один оборот шнека смесь перемещается на длину  $L$ , равную шагу шнека  $H$ .

Тогда производительность данного шнека экспандера равна:

$$Q_m = 60 \cdot \pi \cdot F_d \cdot (H - e) \cdot n, \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (2)$$

где  $F_d$  — площадь поперечного сечения потока смеси,  $\text{м}^2$ ;  $H$  — шаг витка шнека, м;  $e$  — толщина витка шнека экспандера, м.

С учетом того, что шнек экспандера имеет конструкцию вала с увеличивающимся диаметром к формирующему устройству

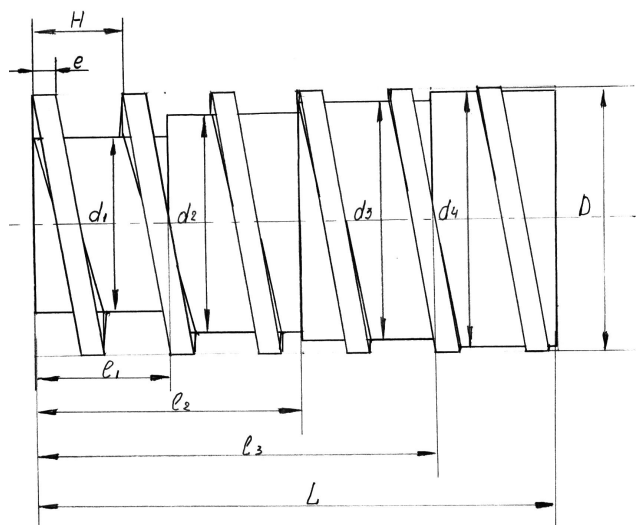


Рис. 1 Шнек экспандера цилиндрический с коэффициентом прессования, увеличивающимся к формирующему устройству

пусковая способность шнека будет определяться участком с максимальным диаметром вала шнека, или минимальным поперечным сечением потока смеси. Площадь поперечного сечения потока смеси  $F_L$  равна:

$$F_L = \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d_{\max}^2), \quad (3)$$

где  $D$  — наружный диаметр вала шнека, м;  $d_{\max}$  — внутренний диаметр последней секции шнека экспандера, м.

С учетом плотности обрабатываемой смеси в последнем витке шнека, производительность экспандера:

$$Q_m = 15 \cdot \pi \cdot (D^2 - d_{\max}^2) \cdot (H - e) \cdot n \cdot \gamma_2, \text{ кг/ч} \quad (4)$$

где  $\gamma_2$  — плотность смеси в межвитковом пространстве последней секции шнека, кг/м<sup>3</sup>.

Однако данная формула не учитывает влияние ряда факторов, которые снижают производительность установки. Поэтому задачей теоретических исследований является определение этих факторов и их влияние на производительность экспандера.

В сравнении с экструдером режимы обработки смеси экспандером являются более щадящими. Они относятся к термодинамическим методам обработки, использующим как статические режимы воздействия, так и динамический эффект давления, температуры и осмоса. В основе экспандирования лежат два процесса — механо-химическая деструкция, наблюдаемая на всех этапах процесса, и «взрыв», или «декомпрессионный шок», происходящий на выходе продукта из экспандера. Рабочую зону экспандера можно разделить на ряд технологических зон — загрузка, сжатие, гомогенизация и непосредственно экспандирование материала.

В зоне загрузки каких-либо изменений в продукте практически не наблюдается. Высокоэластичное состояние продукт приобретает в зоне сжатия. Здесь происходит значительное разрушение клеточной структуры продукта. В зоне гомогенизации продукт приобретает вязкотекучее состояние, при котором структурные преобразования биополимеров (белков, крахмала, клетчатки) максимальны. Основные и наиболее значительные изменения происходят в зоне экспандирования при быстром переносе материала из зоны высокого давления (1,6 МПа) в область атмосферного давления. При этом освобождается аккумулированная продуктом энергия и завершаются структурные преобразования: разрыв клеточных стенок, деструкция, гидролиз [5].

Поскольку продукт поступает в загрузочную зону под действием гравитационных сил, то производительность экспандера будет зависеть от степени заполнения межвиткового пространства шнека в загрузочной зоне. Для характеристики загрузочной зоны экспандера введем коэффициент заполнения  $K_H$  межвиткового пространства, определяемый выражением:

$$K_H = \frac{V_{см}}{V_1}; \quad (5)$$

где  $V_1$  — объем межвиткового пространства в загрузочной зоне шнека, м<sup>3</sup>;  $V_{см}$  — объем смеси в межвитковом пространстве загрузочной зоны шнека, м<sup>3</sup>.

Для определения влияния размеров частиц на коэффициент заполнения смоделируем процесс заполнения межвиткового пространства шнека.

Допустим, что частицы зерна, благодаря налипшему на них материалу, приобретают форму, близкую к шарообразной, с условным диаметром частиц  $d_q$ . Представив виток шнека в виде полости цилиндрической формы (рис. 2) и последовательно заполнив ее частицами шарообразной формы, определим коэффициент заполнения в зависимости от размера частиц и высоты витка шнека при постоянном шаге. Затем, зная объем межвитковой полости, определим коэффициент заполнения витков в зоне загрузки по формуле (5). При этом объем занимаемый частицами смеси определяем по формуле:

$$V_{см} = w \cdot \frac{1}{6} \cdot \pi \cdot d_q^3, \quad (6)$$

где  $w$  — количество частиц смеси в межвитковом пространстве в зоне загрузки шнека;  $d_q$  — условный диаметр частицы смеси, м.

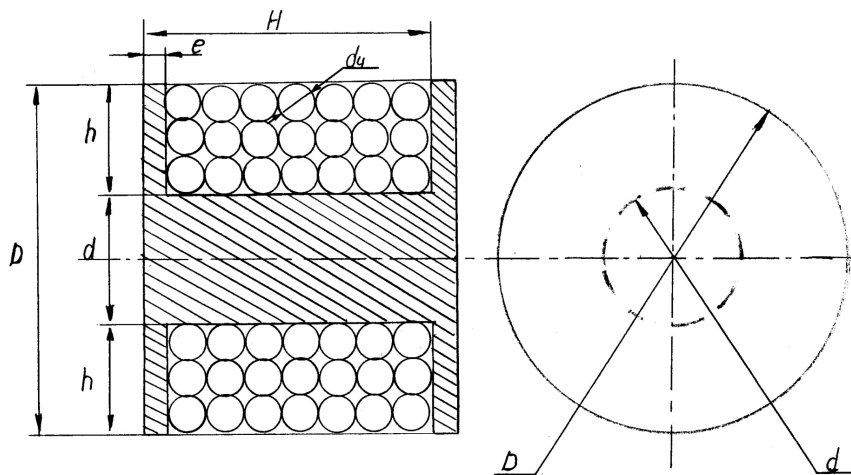


Рис. 2. Элемент витка шнека

По результатам теоретических исследований была построена графическая зависимость, представленная на рис. 3, которая показывает, что наилучшее заполнение межвиткового пространства будет происходить при отношении размера обрабатываемой частицы к высоте витка шнека:

$$\frac{h}{d_{\text{ч}}} \geq 2,8, \quad (7)$$

где  $h$  — высота витка в зоне загрузки шнека экспандера, м.

Рассматривая движение материала по винтовой полости шнека как непрерывное движение, допуская, что в идеальных условиях масса смеси в межвитковом пространстве в начале шнека (зона загрузки) и в конце (предматричная зона) одинакова, т. е.:

$$V_1 \gamma_1 = V_2 \gamma_2, \quad (8)$$

где  $\gamma_1$  — насыпная плотность смеси в зоне загрузки шнека, кг/м<sup>3</sup>;  $V_2$  — объем межвиткового пространства в зоне выгрузки шнека, м<sup>3</sup>.

Тогда плотность смеси в последнем витке:

$$\gamma_2 = \frac{V_1}{V_2} \gamma_1, \quad (9)$$

Обозначим  $\frac{V_1}{V_2} = K_n$  — коэффициент прессования смеси, тогда

$$\gamma_2 = K_n \gamma_1. \quad (10)$$

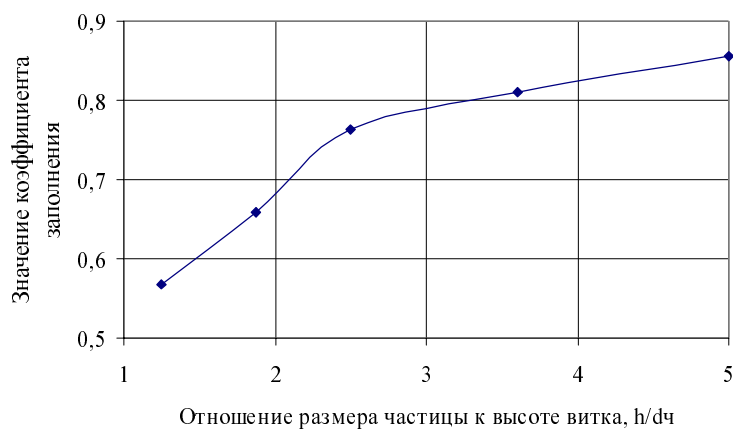


Рис. 3. Зависимость коэффициента заполнения витков шнека в зоне загрузки от соотношения высоты витка шнека к условному диаметру частицы

Во время обработки материала практически во всех зонах происходит его проскальзывание или проворачивание относительно шнека, что также снижает производительность оборудования. Поэтому в формуле производительности необходимо учитывать частоту вращения материала относительно шнека,  $n_m$ :

$$Q_m = 15 \cdot \pi \cdot (D^2 - d_{\max}^2) \cdot \gamma_1 \cdot K_H \cdot K_{II} \cdot n \cdot (n - n_m), \quad (11)$$

или

$$Q_m = 15 \cdot \pi \cdot (D^2 - d_{\max}^2) \cdot \gamma_1 \cdot K_H \cdot K_{II} \cdot n \cdot \left(1 - \frac{n_m}{n}\right), \quad (12)$$

где  $n$  — частота вращения шнека, об/мин;  $n_m$  — частота вращения материала относительно шнека, об/мин.

Обозначив  $\frac{n_m}{n} = K_{СК}$  — коэффициент скольжения материала относительно шнека, производительность экспандера будет равна:

$$Q_m = 15 \cdot \pi \cdot (D^2 - d_{\max}^2) \cdot \gamma_1 \cdot K_H \cdot K_{II} \cdot n \cdot (1 - K_{СК}). \quad (13)$$

Одним из важных параметров, характеризующим геометрические размеры шнека, является угол подъема винтовой линии. От величины этого параметра зависит непрерывность движения материала вдоль оси шнека. Для этого необходимо соблюдение условия:

$$\operatorname{tg} \alpha_p \leq f, \quad (14)$$

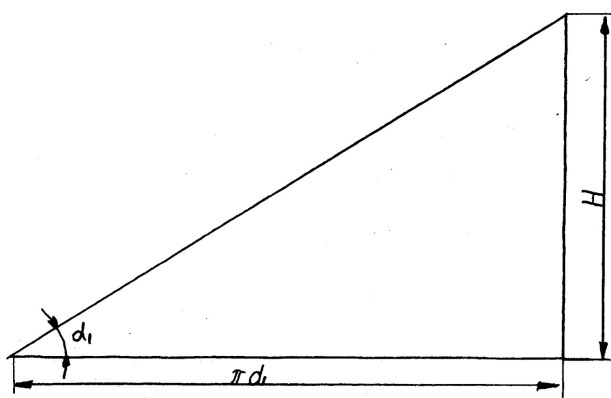


Рис. 4. Развертка винтовой линии поверхности шнека в зоне загрузки

где  $f$  — коэффициент трения обрабатываемой смеси;  $\alpha_p$  — угол подъема винтовой линии витка, град.

При невыполнении условия (14) обрабатываемая смесь начинает перемещаться обратно в зону загрузки шнека, что приводит к нарушению технологического процесса.

Рассмотрим развертку винтовой линии поверхности шнека в зоне загрузки (рис. 4).

$$\operatorname{tg} \alpha_1 = \frac{H}{\pi d_1}, \quad (15)$$

где  $\alpha_1$  — угол подъема винтовой линии витка в зоне загрузки, град;  $d_1$  — внутренний диаметр вала шнека в зоне загрузки, м.

Тогда внутренний диаметр шнека в зоне загрузки с учетом выражения (14) определяется по формуле:

$$d_1 = \frac{H}{\pi f}, \quad (16)$$

Зависимость внутреннего диаметра  $d = F(f)$  при различном шаге и коэффициенте трения представлена на рис. 5.

Анализ графической зависимости (рис. 5) показывает, что в интервале изменения коэффициента трения материала  $f$  от 0,42 до 0,52

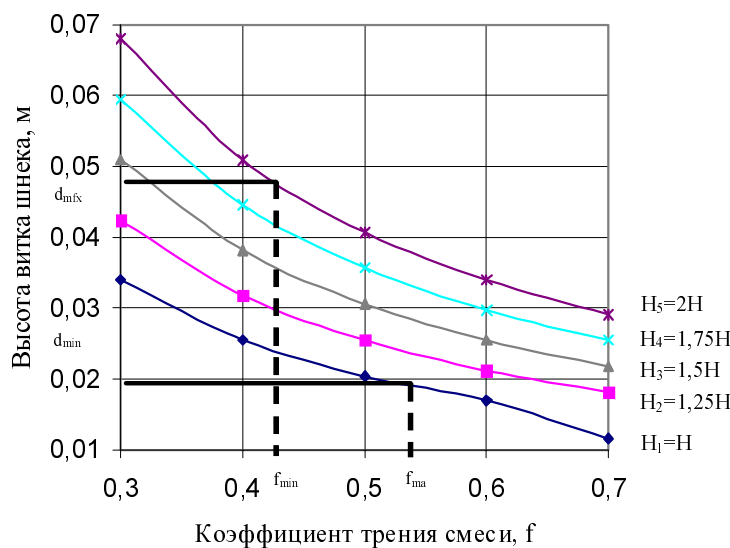


Рис. 5. Зависимость внутреннего диаметра вала  $d$  от коэффициента трения смеси  $f$  при различном шаге витка шнека ( $H = 0,032$  м)

при варьировании шага витка от  $H$  до  $2H$  диаметр вала будет изменяться в пределах от 0,019 до 0,048 м.

Высота витка  $i$ -той секции шнека определяется выражением:

$$h_i = \frac{D - d_i}{2}, \quad (17)$$

где  $d_i$  — внутренний диаметр  $i$  секции шнека, м;  $i$  — номер секций шнека экспандера, 1, 2, 3, ...  $k$ .

Высота витка шнека в зоне загрузки:

$$h_1 = \frac{1}{2} \cdot D - \frac{H}{2 \cdot \pi \cdot \operatorname{tg} \alpha_1}, \quad (18)$$

Результаты ранее проведенных исследований, осуществленные в данной области, позволяют сделать вывод о том, что шнеки с отношением шага к внешнему диаметру менее 0,5 не могут быть рекомендованы к применению в связи с малой подачей смеси к матрице из-за малого угла подъема витка шнека. Этот же показатель по величине больше, чем 1, вызывает чрезмерную подачу смеси к матрице и появлению обратных противотоков.

С учетом изложенного рекомендуется отношение шага к диаметру принимать в следующих пределах:

$$k_{ш} = \frac{H}{D} = 0,5 \dots 1, \quad (19)$$

Преобразуя выражение (18) с учетом формул 16, 19, получим:

$$h_1 = \frac{H \cdot (\pi \cdot f - k_{ш})}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot k_{ш}}, \quad (20)$$

Зависимость высоты витка шнека в зоне загрузки от коэффициента  $k_{ш}$ , и коэффициента трения смеси представлена на рис. 6.

Анализируя графическую зависимость (рис. 6), можно сделать вывод, что в пределах изменения коэффициента трения смеси от  $f_{\min}$  до  $f_{\max}$  и допустимых границах варьирования  $k_{ш}$  (0,5—1) высота витков шнека может находиться в пределах от 0,008 до 0,046 м.

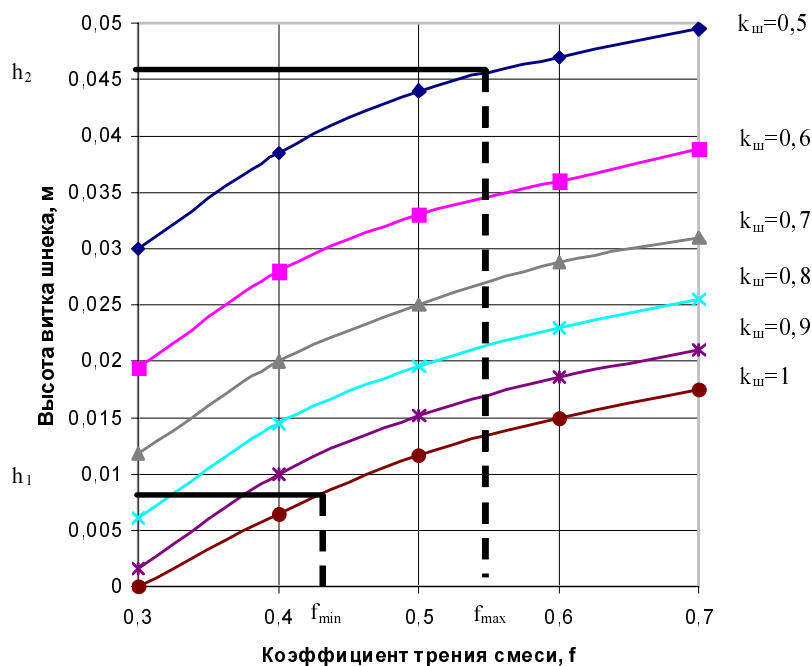


Рис. 6. Зависимость высоты витка шнека от коэффициента трения смеси

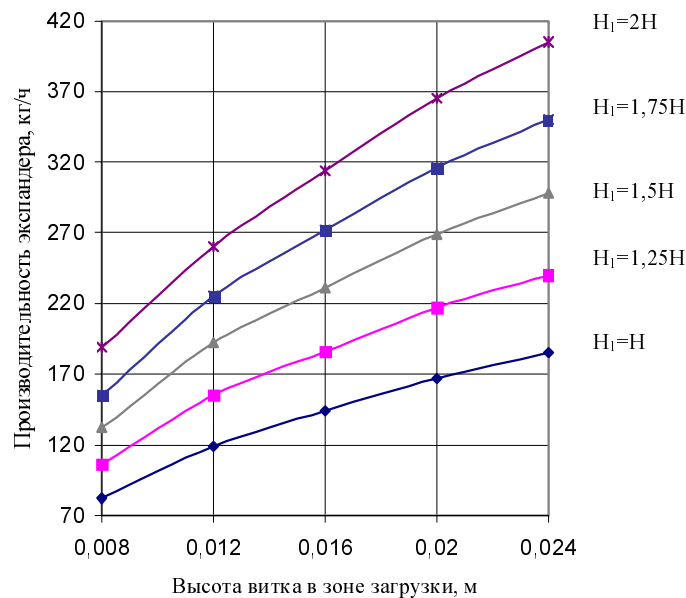


Рис. 7. Зависимость производительности экспандера от физико-механических свойств смеси

С учетом всего изложенного формула фактической производительности шнека примет вид:

$$Q_{\phi} = 60 \cdot \left( \frac{H \cdot (\pi \cdot f - k_{\text{ш}})}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot k_{\text{ш}}} - \frac{(d_{\text{max}} - d_1)}{2} \right) \cdot \left( \frac{H \cdot (\pi \cdot f - k_{\text{ш}})}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot k_{\text{ш}}} + \frac{d_{\text{max}} + d_1}{2} \right) \times \quad (21)$$

$$\times (H - e) \cdot \gamma_1 \cdot K_H \cdot K_n \cdot n \cdot (1 - K_{CK}),$$

Данная формула позволяет учесть влияние конструктивных, кинематических факторов и физико-механических свойств обрабатываемой смеси на фактическую производительность экспандера.

Зависимость фактической производительности от высоты витка в зоне загрузки и шага витка при  $f=0,48$ ;  $k_{\text{ш}}=0,88$ ;  $d_{\text{max}}=0,069$  м;  $d_1=0,048$  м;  $K_H=0,78$ ;  $K_n=3,6$ ;  $K_{CK}=0,92$ ;  $n=280$  об/мин;  $\gamma_1=680$  кг/м<sup>3</sup> представлена на рис. 7.

Таким образом, проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволяют определить основные параметры шнека — основного рабочего органа экспандера в зависимости от разных условий, а также показатели работы самого процесса экспандирования кормовых материалов. Они будут использованы при разработке методики расчета и проектирования нового подобного оборудования с предварительным подогревом матрицы. Такая методика будет опубликована позднее, в одном из следующих номеров журнала.

### Литература

1. Шаршунов В. А., Червяков А. В., Курзенков С. В. Состояние и тенденции применения новых ресурсосберегающих технологий при производстве комбикормов. М., 2004.
2. Шаршунов В. А. и др. Механизация приготовления комбикормов. Мн., 2003.
3. Шаршунов В. А., Червяков А. В., Козлов С. И., Радченко А. А. // Агропанорама. 2000. № 4. С. 7—11.
4. Прессы пищевых и кормовых производств / Под ред. А. Я. Соколова. М., 1973.
5. Черняев Н. П. Технология комбикормового производства. М., 1992.
6. Гуськов К. П. Исследование нагнетающих шнеков макаронных прессов и их механический расчет: Тр. МТИПП. 1949.
7. Лукьянов В. В. Технология и оборудование макаронного производства. М., 1951.

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

### SUBSTANTIATION OF OPTIMAL CONSTRUCTIONAL CINEMATIC PARAMETERS OF AUGER WORKING PART OF EXPANDER

### Summary

Calculation models for determination of main parameters of operating of expander of fodder grain have been proved and optimal constructional and cinematic parameters of its auger (main working part) have been determined on a base of theoretical and experimental researches.