

Обоснование рациональных конструкционных параметров шнека переменного шага пресс-экструдера

Substantiation of rational design parameters of variable pitch screw of an extruder

И. Е. ПРИПОРОВ, канд. техн. наук

Кубанский государственный аграрный университет
имени И. Т. Трубилина, Краснодар, Россия,
ya.krip10@ya.ru

I. E. PRIPOROV, PhD in Engineering

I. T. Trubilin Kuban State Agrarian University,
Krasnodar, Russia,
ya.krip10@ya.ru

Анализ эффективности способов подготовки к скармливанию кормового материала (экструдата) показал, что наибольший практический и научный интерес представляет тепловой способ обработки, для которого используется пресс-экструдер КМЗ-2. Исследования В. В. Новикова позволили установить, что в процессе образования экструдата происходит его перемещение по всей длине рабочей камеры, образованной пространством между витками шнека и внутренней поверхностью корпуса, за счет чего получаемая смесь нагревается и уплотняется. На основании теоретических исследований В. Ю. Фролова установлено, что шнек должен иметь переменный шаг, уменьшающийся по мере продвижения вдоль его оси обрабатываемого кормового материала. Перемещаясь вдоль оси шнека, кормовой материал уплотняется и доходит до состояния, позволяющего принимать необходимую форму в соответствии с требованиями к процессу. Определение рациональных параметров шнека переменного шага в зонах загрузки и прессования пресс-экструдера представляет весьма важную задачу как с теоретической, так и с практической точки зрения. Цель статьи состоит в определении рациональных конструкционных параметров шнека переменного шага пресс-экструдера в зонах загрузки и прессования обрабатываемого кормового материала на основе подсолнечного жмыха. На начальном этапе рассмотрены конструкционные параметры шнека переменного шага пресс-экструдера в зоне загрузки обрабатываемого кормового материала, на следующем этапе — процесс его уплотнения и прессования шнеком. В результате теоретических исследований шнека переменного шага пресс-экструдера КМЗ-2 установлено, что увеличение плотности обрабатываемого кормового материала на основе подсолнечного жмыха происходит пропорционально уменьшению шага витка шнека. Плотность обрабатываемого кормового материала зависит от его физико-механических свойств.

Ключевые слова: пресс-экструдер; шнек переменного шага; конструкционные параметры; подсолнечный жмых; зоны загрузки и прессования корма.

The analysis of effectiveness of methods of feed material (extrudate) preparation for feeding showed that the thermal method of its processing with the use of the KMZ-2 extruder is of most practical and academic interest. The studies carried out by V. V. Novikov showed that in the process of its formation the extrudate moves throughout the length of working chamber in the space between the screw flights and the inner surface of body, due to this the obtained mixture is heated and compacted. Based on the theoretical researches carried out by V. Yu. Frolov, it was found that the screw should have a variable pitch gradually decreasing with the movement of the processed feed material along its axis. During its movement the processed feed material is compacted and reaches the condition that allows to take the required shape in accordance with process requirements. Determination of rational parameters of variable pitch screw of extruder in areas for loading and pressing is a very important task on both practical and theoretical grounds. The aim of the article is to determine the rational design parameters of variable pitch screw of extruder in areas for loading and pressing of processed feed material on the basis of sunflower cake. At the initial stage, the design parameters of variable pitch screw of extruder in the area for loading of processed feed material were considered. At the next stage, the process of its compaction and compressing by means of screw was considered. As a result of theoretical researches of variable pitch screw of the KMZ-2 extruder, it was found that the density increasing of the processed feed material on the basis of sunflower cake is proportional to the decreasing of pitch of screw flight. The density of processed feed material depends on its physical and mechanical properties.

Keywords: extruder; variable pitch screw; design parameters; sunflower cake; areas for loading and pressing of feed.

Введение

Анализ эффективности способов подготовки к скармливанию кормового материала (экструдата) показал, что наибольший практический и научный интерес представляет тепловой способ обработки [1], для которого используется пресс-экструдер КМЗ-2 (рис. 1).

Исследования В. В. Новикова [1, 2] позволили установить, что в процессе образования экструдата происходит его перемещение по всей длине рабочей камеры, образованной пространством между витками шнека и внутренней поверхностью корпуса, за счет чего полу-

чаемая смесь нагревается и уплотняется.

На основании теоретических исследований В. Ю. Фролова [3] установлено, что шнек должен иметь переменный шаг (см. рис. 1), уменьшающийся по мере продвижения вдоль его оси обрабатываемого кормового материала (ОКМ). По мере перемещения вдоль оси шнека ОКМ уплотняется и доходит до состояния, позволяющего принимать необходимую форму в соответствии с требованиями к процессу.

Анализ технологического процесса пресс-экструдера, проведенный А. А. Курочкиным и В. В. Новиковым [5], показал, что шнек служит как для перемещения обрабаты-

ваемого сырья, так и для его уплотнения. В связи с этим он обычно включает несколько ступеней, каждая из которых имеет свое назначение. Например, в экструдерах типа КМЗ-2 первая из трех ступеней шнека предназначена для работы в зоне загрузки, где продолжается интенсивное перемешивание (после дозирующего механизма) и перемещение частиц обрабатываемого сырья вдоль оси шнека, а также начинается их уплотнение.

Цель исследования

Определение рациональных параметров шнека переменного шага в зонах загрузки и прессования пресс-экструдера представляет весьма важ-

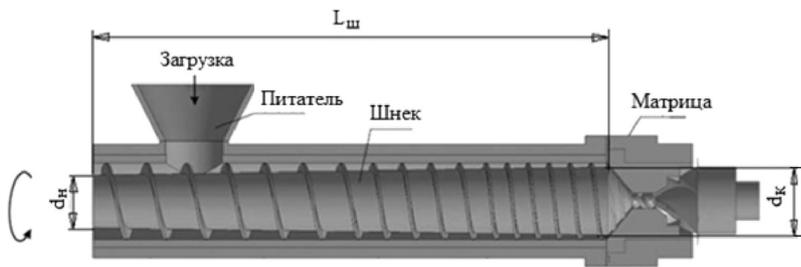


Рис. 1. Шнек переменного шага пресс-экструдера КМЗ-2 [4]

ную задачу как с теоретической, так и с практической точки зрения [5].

В связи с этим цель исследования состоит в определении рациональных конструктивных параметров шнека переменного шага пресс-экструдера в зонах загрузки и прессования ОКМ на основе подсолнечного жмыха.

Определение рациональных параметров шнека

На начальном этапе рассмотрим конструктивные параметры шнека переменного шага пресс-экструдера в зоне загрузки ОКМ на основе подсолнечного жмыха.

Для этого определим угол конусности шнека переменного шага (см. рис. 1, 2) в зависимости от его диаметра и длины по выражению:

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{d_k - d_n}{L_{\text{ш}}},$$

где d_n, d_k — начальный и конечный диаметры шнека, м; $L_{\text{ш}}$ — длина шнека, м.

Длина шнека определяется по выражению [1]:

$$L_{\text{ш}} = t_N(z - 1) + \sum_1^z \Delta b, \quad (1)$$

где t_N — шаг витка шнека при числе оборотов N , м; z — количество витков шнека по длине вала; Δb — ширина витка шнека в нормальном сечении, м.

Подставим $t_N = at_n - 1 = a^N b$ в выражение (1):

$$L_{\text{ш}} = a^N b(z - 1) + \sum_1^z \Delta b, \quad (2)$$

где N — число оборотов шнека; a — коэффициент пропорциональности, $a > 1$; b — шаг витка шнека, м.

С учетом выражения (2) угол конусности шнека:

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{d_k - d_n}{a^N b(z - 1) + \sum_1^z \Delta b}.$$

Из полученного выражения следует, что угол конусности шнека переменного шага пресс-экструдера прямо пропорционален его диаметрам и обратно пропорционален его длине.

Из рис. 2 очевидно, что величина уменьшения диаметра шнека переменного шага:

$$d_1 = d_n - 2t\operatorname{tg}\alpha,$$

где d_1 — диаметр шнека в конце отрезка при $t = a$, м.

При повороте шнека на один оборот (360°) его диаметр в конце отрезка составит

$$d_1 = d_n - 2at\operatorname{tg}\alpha;$$

при повороте на два оборота (720°) от первоначального положения

$$d_2 = d_1 - 2at\operatorname{tg}\alpha;$$

$$d_2 = d_n - 4at\operatorname{tg}\alpha;$$

при повороте на три оборота (1080°) от первоначального положения

$$d_3 = d_2 - 2at\operatorname{tg}\alpha;$$

$$d_3 = d_n - 6at\operatorname{tg}\alpha.$$

При повороте шнека переменного шага на угол $\varphi = 360^\circ N$ его диаметр

$$d_N = d_{N-1} - 2at\operatorname{tg}\alpha.$$

На следующем этапе рассмотрим процесс уплотнения-прессования ОКМ на основе подсолнечного

жмыха шнеком переменного шага пресс-экструдера. Для этого определим закон сжатия [1] ОКМ на основе подсолнечного жмыха [6] шнеком переменного шага пресс-экструдера в зоне прессования.

Получаемый из семян подсолнечный жмых поступает в пресс-экструдер выровненным по физико-механическим свойствам. Семена подсолнечника имеют определенные толщину, ширину и индивидуальную массу [7], получаемые в результате сортирования на зерноочистительных машинах типа МВУ-1500 [8, 9] и универсальных семяочистительных комплексах [10, 11]. В их состав входит не только зерноочистительное оборудование, но и фотоэлектронные сепараторы [12], работающие по бесфракционной и фракционной технологиям [13].

Согласно условию непрерывности потока определим плотность ОКМ на основе подсолнечного жмыха в зоне прессования [1]:

$$\rho \vartheta S = \rho_0 \vartheta_0 S_0;$$

$$\rho = \rho_0 \frac{\vartheta_0 S_0}{\vartheta S}, \quad (3)$$

где ρ_0, ρ — плотности слоя ОКМ на начальном и конечном этапах, достигнутые при деформации, кг/м^3 ; ϑ_0, ϑ — скорости движения слоя ОКМ на начальном и конечном этапах по оси шнека переменного шага, м/с; S_0, S — площади ОКМ на начальном и конечном этапах, м^2 .

Относительное приращение плотности слоя ОКМ рассчитаем по формуле [14]:

$$\varepsilon = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0};$$

$$\rho = \rho_0(\varepsilon + 1). \quad (4)$$

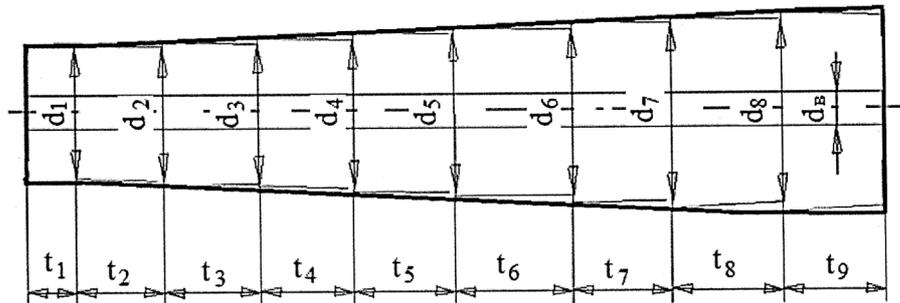


Рис. 2. Схема к уплотнению ОКМ на основе подсолнечного жмыха шнеком переменного шага пресс-экструдера

Объем уплотненного ОКМ (см. рис. 2) в начале и конце шнека переменного шага:

$$V_0 = 2\delta_0 S_0; \quad V = 2\delta S, \quad (5)$$

где δ_0, δ — толщина прессуемого ОКМ на начальном и конечном этапах прессования, м.

Подставим выражения (4) и (5) в (3), преобразуем и окончательно получим плотность ОКМ в зоне прессования:

$$\rho = \rho_0 \frac{\vartheta_0 \delta}{\vartheta \delta_0} (\varepsilon + 1). \quad (6)$$

Анализ уравнения (6) показывает, что плотность ОКМ на основе подсолнечного жмыха в зоне прессования зависит от его физико-механических свойств.

Основное уравнение прессования ОКМ, представленное в степенной форме, имеет вид [15]:

$$P = c\varepsilon^m; \\ \varepsilon = \sqrt[m]{\frac{P}{c}}. \quad (7)$$

Выразив из уравнения (6) относительное приращение плотности ε и приравняв левую часть к выражению (7), получим давление ОКМ в зоне прессования:

$$\varepsilon = \frac{\rho \vartheta \delta_0}{\rho_0 \vartheta_0 \delta} - 1;$$

$$\frac{\rho \vartheta \delta_0}{\rho_0 \vartheta_0 \delta} - 1 = \sqrt[m]{\frac{P}{c}};$$

$$P = c \left(\frac{\rho \vartheta \delta_0}{\rho_0 \vartheta_0 \delta} - 1 \right)^m. \quad (8)$$

Обозначим $c = P_0$, так как используется единица измерения МПа [15]. Тогда выражение (8) окончательно примет вид:

$$P = P_0 \left(\frac{\rho \vartheta \delta_0}{\rho_0 \vartheta_0 \delta} - 1 \right)^m. \quad (9)$$

Анализ выражения (9) показывает, что давление в зоне прессования ОКМ на основе подсолнечного жмыха зависит от его физико-механических свойств.

Масса ОКМ, получаемая в результате сжатия:

$$M = 2\rho\delta S.$$

При перемещении ОКМ на путь, равный шагу витка шнека, уменьше-

ние его массы при повороте на 360° составит:

$$\Delta M = \rho_0 \frac{d_H - d_K}{2} t_1 \delta.$$

Учитывая, что $t_1 = ba$, при повороте шнека переменного шага на один оборот относительное уплотнение ОКМ:

$$\Delta M_1 = \rho_0 \frac{d_H - d_K + 2atg\alpha}{2} ba\delta;$$

$$\Delta M_1 = \rho_0 a^2 b \delta t g \alpha.$$

При повороте шнека на два оборота (720°) с учетом $t_2 = ba^2$

$$\Delta M_2 = \rho_1 \frac{d_1 - d_2}{2} t_2 \delta;$$

$$\Delta M_2 = \frac{d_H - 2atg\alpha - (d_H - 4atg\alpha)}{2} \rho_1 t_2 \delta;$$

$$\Delta M_2 = \rho_1 a^3 b \delta t g \alpha.$$

При повороте шнека на три оборота (1080°) с учетом $t_3 = ba^3$

$$\Delta M_3 =$$

$$= \rho_0 \frac{d_H - 4atg\alpha - (d_H - 6atg\alpha)}{2} \rho_2 t_3 \delta;$$

$$\Delta M_3 = \rho_2 a^4 b \delta t g \alpha.$$

При $\varphi = 360^\circ N$ поворота шнека переменного шага относительное уплотнение ОКМ:

$$\Delta M_N = \int_1^N \rho_{N-1} a^{N-1} b \delta t g \alpha. \quad (10)$$

Формула (10) выражает относительное уплотнение ОКМ на основе подсолнечного жмыха при повороте шнека переменного шага на угол $\varphi = 360^\circ N$.

На основе непрерывности потока

$$\Delta M_1 = \Delta M_2 = \Delta M_3;$$

$$\rho_0 a^2 b \delta t g \alpha = \rho_1 a^3 b \delta t g \alpha = \rho_2 a^4 b \delta t g \alpha;$$

$$\rho_0 a = \rho_1 a^2 = \rho_2 a^3;$$

$$\rho_0 = \rho_1 a = \rho_2 a^2, \quad (11)$$

где ρ_1, ρ_2 — плотности ОКМ при повороте шнека переменного шага на один и два оборота (360 и 720° соответственно), кг/м^3 .

Из выражения (11) очевидно, что:

$$\rho_1 = \frac{\rho_0}{a};$$

$$\rho_2 = \frac{a}{a^2} \rho_1;$$

$$\rho_2 = \frac{\rho_0}{a^2} = \frac{\rho_1}{a}. \quad (12)$$

Заключение

В результате теоретических исследований шнека переменного шага пресс-экструдера КМЗ-2 установлено, что увеличение плотности ОКМ на основе подсолнечного жмыха происходит пропорционально уменьшению шага его витка (выражение (12)). Плотность ОКМ на основе подсолнечного жмыха зависит от его физико-механических свойств.

Литература и источники

1. Фролов В. Ю. Теоретические и экспериментальные аспекты разработки технологий и технических средств, приготовления концентрированных кормов на основе соевого белка. Краснодар: Изд-во КубГАУ, 2010. 140 с.
2. Новиков В. В. Методика расчета пресс-экструдера с "греющими" шайбами // Науч. тр. СИМСХ. Саратов, 1983. Вып. 43. С. 64—68.
3. Фролов В. Ю. Совершенствование технологий и технических средств приготовления и раздачи высококачественных кормов на малых фермах: Дис. ... д-ра техн. наук. Новосибирск, 2002. 302 с.
4. Остриков А. Н., Василенко В. Н. Экструдирование комбикормов: новые подходы и перспективы // Комбикорма. 2011, № 8. С. 39—42.
5. Курочкин А. А., Новиков В. В. Обоснование рациональных параметров шнека пресс-экструдера в зоне загрузки // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2013, № 6 (10). С. 123—126.
6. Припоров И. Е. Использование подсолнечного жмыха в рационе крупного рогатого скота // Инновации в сельском хозяйстве. 2015, № 5 (15). С. 184—187.
7. Шафоростов В. Д., Припоров И. Е. Влияние толщины, ширины и индивидуальной массы семян подсолнечника на скорость их витания // Масличные культуры. Научно-технический бюллетень ВНИИМК. 2010, № 1 (142—143). С. 76—80.
8. Припоров И. Е. Механико-технологическое обоснование процесса разделения компонентов вороха семян подсолнечника на воздушно-решетных зерноочистительных машинах. Краснодар: Изд-во КубГАУ, 2016. 212 с.
9. Трубилин Е. И., Припоров И. Е. Технические средства для послеуборочной обработки семян подсолнечника: Учеб. пособие. Краснодар: Изд-во КубГАУ, 2015. 237 с.
10. Припоров И. Е., Шафоростов В. Д. Технология послеуборочной обработки семян масличных культур // Инновации в сельском хозяйстве. 2014, № 5 (10). С. 10—14.

11. Припоров И. Е., Лазебных Д. В. Рациональная технология послеуборочной обработки семян подсолнечника // Научный журнал КубГАУ. 2015, № 112. С. 1475—1485.

12. Припоров И. Е. Обоснование применения оптического фотоэлектронного сепаратора в составе универсального семяочистительного комплекса // Конкурентная способность отечественных гибридов, сортов и технологии возделывания масличных культур: Мат-лы 8-й междунар. конф. молодых ученых и специалистов. Краснодар: ВНИИМК, 2015. С. 138—141.

13. Припоров И. Е., Садыкова М. А. Усовершенствование работы фотоэлектронного сепаратора при разделении семян подсолнечника // Научный журнал КубГАУ. 2015, № 112. С. 1486—1498.

14. Федоренко И. Я., Смышляев А. А. Моделирование ударного нагружения слоя кормового материала // Вестник АГАУ. 2015, № 5 (127). С. 136—141.

15. Федоренко И. Я. Альтернативная теория прессования кормов // Вестник АГАУ. 2013, № 3 (101). С. 95—98.

References

1. Frolov V. Yu. *Teoreticheskie i eksperimental'nye aspekty razrabotki tekhnologiy i tekhnicheskikh sredstv, prigotovleniya kontsentrirrovannykh kormov na osnove soevogo belka* [Theoretical and experimental aspects of development of technologies and equipment, preparation of concentrated feed based on soy protein]. Krasnodar, Kuban State Agrarian University Publ., 2010, 140 p.

2. Novikov V. V. A method for calculation of extruder with "heating" washers.

Nauch. tr. SIMSKh [Proc. of Saratov Institute of Agricultural Mechanization]. Saratov, 1983, no. 43, pp. 64—68 (in Russ.).

3. Frolov V. Yu. *Sovershenstvovanie tekhnologiy i tekhnicheskikh sredstv prigotovleniya i razdachi vysokokachestvennykh kormov na malykh fermakh* [Improvement of technologies and equipment for preparation and distribution of high-quality feed in small farms]. DSc in Engineering thesis. Novosibirsk, 2002, 302 p.

4. Ostrikov A. N., Vasilenko V. N. Extrusion of mixed feed: new approaches and prospects. *Kombikorma*, 2011, no. 8, pp. 39—42 (in Russ.).

5. Kurochkin A. A., Novikov V. V. Substantiation of rational parameters of extruder screw in loading zone. *XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus*, 2013, no. 6 (10), pp. 123—126 (in Russ.).

6. Priporov I. E. Use of sunflower cake in the diet of cattle. *Innovatsii v sel'skom khozyaystve*, 2015, no. 5 (15), pp. 184—187 (in Russ.).

7. Shaforostov V. D., Priporov I. E. Influence of thickness, width and individual weight of sunflower seeds on their soaring velocity. *Maslichnye kul'tury. Nauchno-tekhnicheskiiyulleten' VNIIMK*, 2010, no. 1 (142—143), pp. 76—80 (in Russ.).

8. Priporov I. E. *Mekhaniko-tekhnologicheskoe obosnovanie protsessa razdeleniya komponentov vorokha semyan podsolnechnika na vozdushno-reshetnykh zernoochistitel'nykh mashinakh* [Mechanical and technological substantiation of the process of separation of components of sunflower seeds heap in the air-sieve grain-cleaning machines]. Krasnodar, Kuban State Agrarian University Publ., 2016, 212 p.

9. Trubilin E. I., Priporov I. E. *Tekhnicheskie sredstva dlya posleuborochnoy obrabotki semyan podsolnechnika* [Technical equipment for post-harvest processing of sunflower seeds]. Krasnodar, Kuban State Agrarian University Publ., 2015, 237 p.

10. Priporov I. E., Shaforostov V. D. Technology of post-harvest processing of oilseeds. *Innovatsii v sel'skom khozyaystve*, 2014, no. 5 (10), pp. 10—14 (in Russ.).

11. Priporov I. E., Lazebnykh D. V. Rational technology of post-harvest processing of sunflower seeds. *Nauchnyy zhurnal KubGAU*, 2015, no. 112, pp. 1475—1485 (in Russ.).

12. Priporov I. E. Substantiation of application of optical colour sorter as part of a universal seed cleaning complex. *Konkurentnaya sposobnost' otechestvennykh gibridov, sortov i tekhnologii vozdelvaniya maslichnykh kul'tur: Mat-ly 8-y mezhdunar. konf. molodykh uchenykh i spetsialistov* [Competitive ability of domestic hybrids, varieties and cultivation technology of oilseed. Proc. of the 8th int. conf. of young scientists and specialists]. Krasnodar, All-Russian Research Institute of Oilseeds, 2015, pp. 138—141 (in Russ.).

13. Priporov I. E., Sadykova M. A. Improving the performance of colour sorter for the separation of sunflower seeds. *Nauchnyy zhurnal KubGAU*, 2015, no. 112, pp. 1486—1498 (in Russ.).

14. Fedorenko I. Ya., Smyshlyayev A. A. Modeling of shock loading of feed material layer. *Vestnik AGAU*, 2015, no. 5 (127), pp. 136—141 (in Russ.).

15. Fedorenko I. Ya. Alternative theory of feed pressing. *Vestnik AGAU*, 2013, no. 3 (101), pp. 95—98 (in Russ.).