

Увеличение эффективности работы одношнекового экструдера

Фролов Д.И., Потапов М.А.

Аннотация. Экструзия кормов является одним из наиболее энергоемких процессов в промышленности. Одношнековые экструдеры из-за их многочисленных преимуществ имеют большое значение в сельском хозяйстве во всем мире. Чтобы повысить эффективность процесса экструзии сырья, был разработан шнек экструдера с рифленой кромкой. Данная конструкция обеспечивает условие ограничения экструдруемого материала, что помогает уменьшить утечку сырья через зазор между кромкой шнека и стенкой цилиндра экструдера. Следовательно, целью данного исследования является повышение эффективности работы экструдера путем оптимизации рабочих параметров, на основе изучения взаимодействия подающего и винтового элементов. В данной статье представлены результаты экспериментальных исследований, проводимых в лабораторных условиях с использованием экструдера ЭК-40. Определение влияния факторов, а именно типа шнека с различной высотой канавок на кромке винта, содержания влаги в экструдруемом материале и ширина отверстия питателя на эффективность работы экструдера, было выполнено с использованием трехфакторного эксперимента и методологии поверхности отклика. Выявлены оптимальные параметры работы, при которых обеспечивается максимальная эффективность работы экструдера. При этом эффективность работы экструдера возрастает на 23-25% по сравнению со стандартным шнеком с ровной поверхностью кромки.

Ключевые слова: экструдер, шнек, кромка, эффективность работы, поверхность отклика.

Для цитирования: Фролов Д.И., Потапов М.А. Увеличение эффективности работы одношнекового экструдера // Инновационная техника и технология. 2020. № 2 (23). С. 42–47.

Increasing the efficiency of a single screw extruder

Frolov D.I., Potapov M.A.

Abstract. Feed extrusion is one of the most energy intensive processes in the industry. Because of their many advantages, single screw extruders are of great importance in agriculture around the world. To increase the efficiency of the extrusion process of raw materials, an extruder screw with a grooved edge was developed. This design provides a condition for limiting the extrudable material, which helps to reduce the leakage of raw materials through the gap between the screw edge and the wall of the extruder barrel. Therefore, the purpose of this study is to increase the extruder's efficiency by optimizing operating parameters, based on the study of the interaction of the feed and screw elements. This article presents the results of experimental studies conducted in laboratory conditions using an EC-40 extruder. Determining the influence of factors, namely, the type of screw with different height of the grooves on the screw edge, the moisture content in the extrudable material and the width of the feeder hole on the extruder efficiency, was carried out using a three-factor experiment and the response surface methodology. The optimal operating parameters have been identified at which the maximum efficiency of the extruder is ensured. At the same time, the extruder efficiency increases by 23-25% compared with a standard screw with a flat edge surface.

Keywords: extruder, screw, edge, efficiency, response surface.

For citation: Frolov D.I., Potapov M.A. Increasing the efficiency of a single screw extruder. Innovative Machinery and Technology. 2020. No.2 (23). pp. 42–47. (In Russ.).

Введение

Экструдеры, оснащенные шнеком, имеют большое значение в сельском хозяйстве во всем мире. Одношнековые экструдеры наиболее широко используются для экструзии сырья и смесей. Они изготавливаются с винтами разного диаметра, шага винта и конфигурации. Винт имеет ровную поверхность кромки. Однако у них есть серьезный недостаток. В частности, из-за проскальзывания материала происходит утечка сырья через зазор между поверхностью кромки шнека и внутренней стенкой цилиндра экструдера. Это приводит к снижению производительности и эффективности работы экструдера. Вопросы повышения производительности и эффективности работы экструдера, а также качества экструдата зависят от рабочих параметров экструдера, в частности, от конструкции шнека [8-12].

Разработка шнека с рифленой поверхностью обеспечивает уменьшение утечки подачи через зазор между поверхностью кромки шнека и стенкой цилиндра экструдера за счет создания условий для удержания экструдированного материала.

Шнек экструдера с ровной поверхностью кромки был разработан и исследован многими исследователями [2, 5, 6]. При этом оптимизация параметров экструдера с использованием эксперимента была проведена многочисленными исследователями [1, 3, 4, 7].

Следовательно, данное исследование направлено на повышение эффективности работы экструдера путем оптимизации рабочих параметров, на основе изучения взаимодействия подающего и винтового элементов.

Объекты и методы исследований

Для повышения эффективности процесса экструзии сырья и смесей был разработан шнек экструдера с рифленой поверхностью кромки. Рифленая кромка приводит к увеличению коэффициента трения во время работы экструдера, поскольку рифленая поверхность заполнена материалом и возникает внутреннее трение между частицами материала. Следовательно, это приводит к ограничению ма-

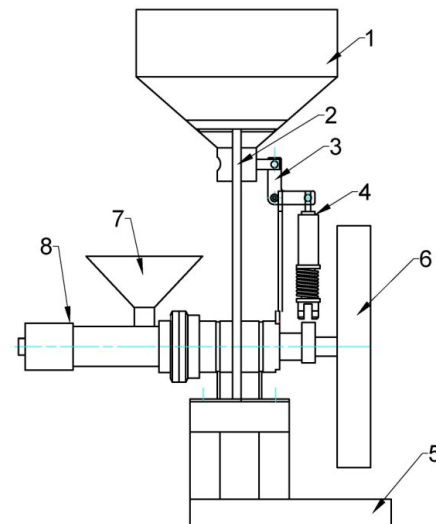


Рис. 1. Экструдер ЭК-40: 1 - бункер; 2 - держатель бункера; 3 - механизм подачи смеси; 4 - толкатель; 5 - рама; 6 - ведомое колесо; 7 - приемная воронка; 8 - рабочая часть

териала, подлежащего экструзии между поверхностью кромки шнека и стенкой цилиндра экструдера. Таким образом, этот тип конструкции обеспечивает улучшенное взаимодействие шнека подачи с экструдером с точки зрения уменьшения утечки сырья, тем самым увеличивая эффективность работы экструдера.

Для подтверждения этой гипотезы были проведены экспериментальные исследования в лабораторных условиях с использованием экструдера ЭК-40 для изучения влияния рабочих параметров на эффективность работы экструдера.

Процесс экструзии происходит следующим образом. Электродвигатель, установленный в раме 5 через ременную передачу, вращает шнек, расположенный в рабочей части 8 в цилиндрическом цилиндре (рис. 1.). Часть материала, подготовленная для экструзии, вручную подается в бункер 1 смеси. Механизм подачи 3 приводится в движение через эксцентрик. Материал подается через приемную воронку 7, соединенную непосредственно с цилиндром, установленной на раме 5. Масса захватывается шнеком и движется вдоль оси экструдера к формирующей головке, которая закреплена на рабочей части 8. Созданное давление в цилиндре экструдера выдавливает экструдат через отверстия матрицы наружу.

Основными исследуемыми факторами были: тип шнека с различной высотой канавок на кромках, влагосодержание зернового материала и ширина отверстия питателя.

В ходе экспериментов использовались 3 типа одиночного винта с различной высотой канавок на кромке, величина которых составляла 0; 0,5 и 1 мм. Экспериментальные исследования проводились с зерновым материалом (пшеницей), содержание влаги в котором изменялось путем добавления воды и контролировалось влагомером. Значение влагосодержания составило 18, 22 и 26%. Подача зернового материала осуществлялась путем открытия

Таблица 1 – Кодирование уровней факторов

Уровень фактора	Факторы		
	X1	X2	X3
Верхний уровень (+1)	18	0	15
Основной уровень (0)	22	0,5	25
Нижний уровень (-1)	26	1	35
Интервал варьирования	4	0,5	10

Таблица 2 – Матрица трехфакторного эксперимента в кодированных значениях

Планир. план	3 факт. план Бокса-Бенкена			
	X1	X2	X3	Y
1	-1	-1	0	22,72
2	1	-1	0	19,12
3	-1	1	0	18,58
4	1	1	0	22,42
5	-1	0	-1	12,48
6	1	0	-1	16,36
7	-1	0	1	11,92
8	1	0	1	16,34
9	0	-1	-1	10,51
10	0	1	-1	18,26
11	0	-1	1	11,53
12	0	1	1	12,47
13	0	0	0	24,55
14	0	0	0	24,47
15	0	0	0	24,59

Таблица 3 – Матрица трехфакторного эксперимента в раскодированных значениях

Планир. план	3 факт. план Бокса-Бенкена (Таблица данных 1)			
	X1	X2	X3	Y
1	26	1	25	22,72
2	18	1	25	19,12
3	26	0	25	18,58
4	18	0	25	22,42
5	26	0,5	35	12,48
6	18	0,5	35	16,36
7	26	0,5	15	11,92
8	18	0,5	15	16,34
9	22	1	35	10,51
10	22	0	35	18,26
11	22	1	15	11,53
12	22	0	15	12,47
13	22	0,5	25	24,55
14	22	0,5	25	24,47
15	22	0,5	25	24,59

горловины питателя на 15, 25 и 35 мм, соответствующих минимальному, среднему и максимальному уровням соответственно. Значения кодирования этих факторов приведены в таблице 1.

В качестве критерия оптимизации был рассмотрен показатель эффективности экструдера Q/N (кг/кВт·ч). Этот показатель позволяет определить эффективность работы экструдера и объективно оценить взаимосвязь между производительностью и потреблением энергии для процесса экструзии. Определение влияния исследуемых факторов на эффективность работы экструдера проводилась с использованием трёхфакторного эксперимента и

методологии поверхности отклика. Для этого были проведены трехфакторные эксперименты по проектированию на трех уровнях вариативности, матрица проектирования которых представлена в таблице 2. План эксперимента и математическая обработка были выполнены с использованием программы Statistica.

Результаты и их обсуждение

После проведения экспериментальных исследований доверительные интервалы оценивались по критерию Стьюдента, адекватность модели - по критерию Фишера. На основании результатов исследования было получено уравнение регрессии, описывающее влияние высоты канавок на кромке шнека, влагосодержания зерна и ширина отверстия питателя на эффективность работы экструдера в процессе экструдирования зернового материала. Уравнение предсказания в закодированном виде имеет следующий вид:

$$Y = 24,537 + 1,0675X_1 - 1,372X_1^2 + 0,98125X_2 - 2,455X_2^2 - 0,6688X_3 - 8,890X_3^2 + 1,8600X_1 \cdot X_2 + 0,135X_1 \cdot X_3 - 1,703X_2 \cdot X_3$$

Наиболее существенное влияние на эффективность работы экструдера оказывают квадратичные факторы, в частности, X_2 (высота канавок на кромке шнека) и X_3 (ширина питателя). Следующими по важности являются парные взаимодействия X_1X_2 и X_2X_3 , тогда как наименее значимые имеют линейные коэффициенты X_3 и X_2 . Увеличение значений линейных факторов X_1 , X_2 и уменьшение значения фактора X_3 приводит к увеличению эффективности работы экструдера.

Величина отрицательный знак коэффициентов X_3 и X_3^2 указывают на то, что с увеличением ширина отверстия питателя эффективность снижается. Интерпретация различных знаков для парных взаимодействий X_1X_2 и X_2X_3 приводит к тому, что величина этих факторов может оказывать как положительное, так и отрицательное влияние на эффективность работы экструдера.

Графики реакции влияния исследуемых факторов на эффективность работы экструдера показаны на рисунках 2-4.

Анализ отклика поверхности участка влияния исследуемых факторов X_1 (влагосодержание зерна) и X_2 (высота канавок кромки шнека) на эффективность работы экструдера показывает, что максимальное значение критерия Y ($Q/N=25,15$ кг/кВт·ч) обеспечивается при влагосодержании зерна 19,2% (рис. 2). Для коэффициента X_2 максимальное значение критерия достигается при высоте канавок кромки винта $H=0,23$ мм.

Анализ графика зависимости влияния факторов X_1 (влагосодержание зерна) и X_3 (ширина отверстия питателя) на эффективность работы экструдера показывает, что максимальное значение

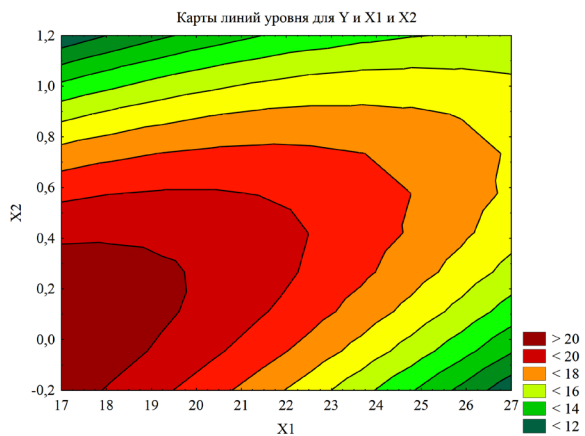


Рис. 2. График влияния влагосодержания зерна X_1 и высоты канавок кромки шнека X_2 на эффективность работы экструдера

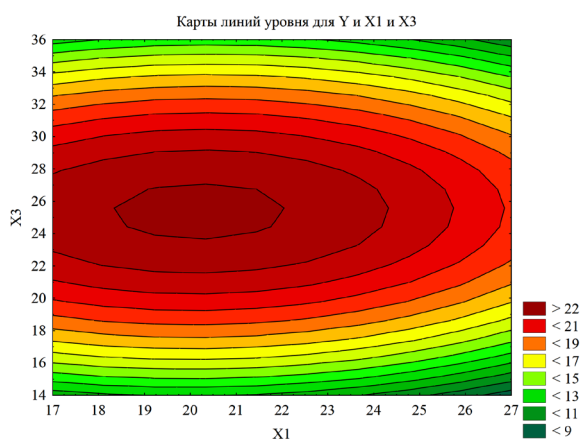


Рис. 3. График влияния влагосодержания зерна X_1 и ширины отверстия питателя X_3 на эффективность работы экструдера

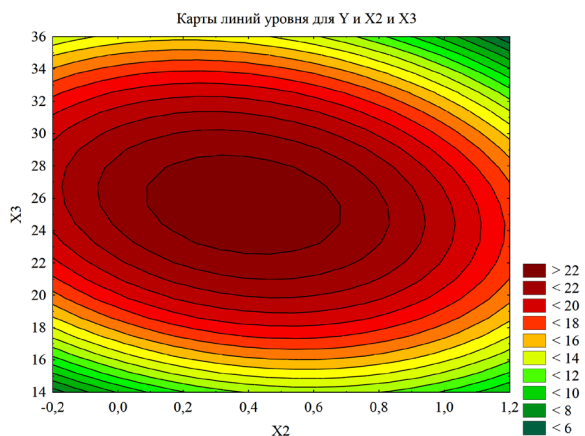


Рис. 4. График влияния высоты канавок кромки шнека X_2 и ширины отверстия питателя X_3 на эффективность работы экструдера

эффективности работы экструдера $Q/N=24,77$ кг/кВт·ч достигается для фактора X_1 , равного влагосодержанию зерна 19,5% (рис. 3). Для фактора X_3 максимальное значение эффективности работы экструдера приводится при соответствующей ширине отверстия питателя $V=25,38$ мм.

Анализ графика зависимости поверхности влияния факторов X_2 (высота канавок кромки шнека) и X_3 (ширина отверстия питателя) на

эффективность работы экструдера показывает, что максимальное значение эффективности производительности экструдера $Q/N=24,68$ кг/кВт·ч достигается для коэффициента X_2 , который соответствует высоте канавок кромки винта $H=0,11$ мм (рис. 4). Максимальное значение критерия для коэффициента X_3 находится при соответствующей ширине отверстия питателя $V=25,59$ мм.

Таким образом, были выявлены оптимальные значения параметров работы: влажность зерна $W=19,2-19,6\%$, высота канавок кромки шнека $H=0,11-0,23$ мм и ширина отверстия питателя $V=25,4-25,6$ мм. При указанных значениях параметров максимальное значение КПД экструдера составляет 24,7–25,2 кг/кВт·ч.

Полученные результаты сравнительных исследований выявили, что при выбранных параметрах работы: высота пазов винтовой кромки шнека $H=0,11-0,23$ мм и ширина отверстия питателя $V=25,4-25,6$ мм и оптимальная влажность зерна $W=19,2-19,6\%$, эффективность работы экструдера увеличивается на 23–25% по сравнению со стандартным шнеком с ровной поверхностью кромки.

Выводы

Шнеки экструдера с ровной поверхностью кромки имеют низкую эффективность из-за утечки подачи через зазор между поверхностью кромки шнека и внутренней стенкой цилиндра экструдера из-за проскальзывания материала.

Разработка шнека рифленой поверхностью кромки обеспечивает уменьшение утечки подачи из-за удержания материала между поверхностью кромки лопасти шнека и стенкой цилиндра экструдера, при этом повышается эффективность работы экструдера.

Экспериментальные исследования выявили влияние выбранных факторов, в частности, типа шнека с различной высотой канавок на кромке, влажности зерна и ширины отверстия питателя на эффективность работы экструдера. В качестве критерия оптимизации был рассмотрен показатель эффективности, который позволяет определять эффективность экструдера и оценивать взаимосвязь между производительностью и потребляемой мощностью процесса экструзии.

Были выявлены оптимальные параметры работы: влажность зерна $W=19,2-19,6\%$, высота канавок кромки шнека $H=0,11-0,23$ мм и ширина отверстия питателя $V=25,4-25,6$ мм, что обеспечивает максимальную эффективность экструдера.

Сравнительные исследования показали, что при выбранных рабочих параметрах эффективность работы экструдера увеличивается на 23–25% по сравнению со стандартным шнеком с ровной поверхностью кромки.

Список литературы

- [1] Altan, A., McCarthy, K. L. & Maskan, M. (2008). Extrusion cooking of barley flour and process parameter optimization by using response surface methodology. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 88(9), 1648-1659.
- [2] Deng, J., Li, K., Harkin-Jones, E., Price, M., Karnachi, N., Kelly, A., Vera-Sorroche, J., Coates, P., Brown, E. & Fei, M. (2014). Energy monitoring and quality control of a single screw extruder. *Applied Energy*, 113, 1775-1785.
- [3] Karunanithy, C. & Muthukumarappan, K. (2011). Optimization of switchgrass and extruder parameters for enzymatic hydrolysis using response surface methodology. *Industrial Crops and Products*, 33(1), 188-199.
- [4] Liang, Y., Hosahalli, S. R. & Joyce, B. (2012). Twin-screw extrusion of corn flour and soy protein isolate (SPI) blends: a response surface analysis. *Food and Bioprocess Technology*, 5(2), 485-497.
- [5] Michelangelli, O. P., Gaspar-Cunha, A. & Covas, J. A. (2014). The influence of pellet-barrel friction on the granular transport in a single screw extruder. *Powder Technology*, 264, 401-408.
- [6] Roland, W., Marschik, C., Krieger, M., Low-Baselli, B. & Miethlinger, J. (2019). Symbolic regression models for predicting viscous dissipation of three-dimensional non-Newtonian flows in single-screw extruders. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 268, 12-19.
- [7] Shihani, N., Kumbhar, B. K. & Kulshreshtha, M. (2006). Modeling of extrusion process using response surface methodology and artificial neural networks. *Journal of Engineering Science and Technology*, 1(1), 31-40.
- [8] Курочкин А.А., Фролов Д.И., Воронина П.К. Определение основных параметров вакуумной камеры модернизированного экструдера // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2015. № 4 (32). С. 172–177.
- [9] Моделирование процесса получения экструдатов на основе нового технологического решения / А.А. Курочкин, Г.В. Шабурова, Д.И. Фролов, П.К. Воронина // Нива Поволжья. 2014. № 30. С. 70–76.
- [10] Повышение эффективности обезвоживания экструдата в вакуумной камере модернизированного экструдера / Д.И. Фролов [и др.] // Нива Поволжья. 2019. № 2 (51). С. 134–143.
- [11] Теоретическое обоснование термовакuumного эффекта в рабочем процессе модернизированного экструдера / А.А. Курочкин, Г.В. Шабурова, Д.И. Фролов, П.К. Воронина // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. 2015. № 3. С. 15–20.
- [12] Improving the efficiency of extrudate dehydration in a vacuum chamber of a modernized extruder / D.I. Frolov [et al.] // Volga Region Farmland. 2019. № 2 (2). P. 87–94.

References

- [1] Altan, A., McCarthy, K. L. & Maskan, M. (2008). Extrusion cooking of barley flour and process parameter optimization by using response surface methodology. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 88 (9), 1648-1659.
- [2] Deng, J., Li, K., Harkin-Jones, E., Price, M., Karnachi, N., Kelly, A., Vera-Sorroche, J., Coates, P., Brown, E. & Fei, M. (2014). Energy monitoring and quality control of a single screw extruder. *Applied Energy*, 113, 1775-1785.
- [3] Karunanithy, C. & Muthukumarappan, K. (2011). Optimization of switchgrass and extruder parameters for enzymatic hydrolysis using response surface methodology. *Industrial Crops and Products*, 33 (1), 188-199.
- [4] Liang, Y., Hosahalli, S. R. & Joyce, B. (2012). Twin-screw extrusion of corn flour and soy protein isolate (SPI) blends: a response surface analysis. *Food and Bioprocess Technology*, 5 (2), 485-497.
- [5] Michelangelli, O. P., Gaspar-Cunha, A. & Covas, J. A. (2014). The influence of pellet-barrel friction on the granular transport in a single screw extruder. *Powder Technology*, 264, 401-408.
- [6] Roland, W., Marschik, C., Krieger, M., Low-Baselli, B. & Miethlinger, J. (2019). Symbolic regression models for predicting viscous dissipation of three-dimensional non-Newtonian flows in single-screw extruders. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 268, 12-19.
- [7] Shihani, N., Kumbhar, B. K. & Kulshreshtha, M. (2006). Modeling of extrusion process using response surface methodology and artificial neural networks. *Journal of Engineering Science and Technology*, 1 (1), 31-40.
- [8] Kurochkin A.A., Frolov D.I., Voronina P.K. Determination of the main parameters of the vacuum chamber of a modernized extruder // Bulletin of the Ulyanovsk State Agricultural Academy. 2015. No. 4 (32). pp. 172-177.
- [9] Modeling the process of obtaining extrudates based on a new technological solution / A.A. Kurochkin, G.V. Shaburova, D.I. Frolov, P.K. Voronin // Niva Volga. 2014. No. 30. pp. 70–76.
- [10] Improving the efficiency of dehydration of the extrudate in the vacuum chamber of a modernized extruder / D.I. Frolov [et al.] // Niva Volga. 2019.No 2 (51). pp. 134–143.

- [11] Theoretical substantiation of thermal vacuum effect in the working process of a modernized extruder / A.A. Kurochkin, G.V. Shaburova, D.I. Frolov, P.K. Voronina // Bulletin of the Samara State Agricultural Academy. 2015. No 3. pp. 15–20.
- [12] Improving the efficiency of extrudate dehydration in a vacuum chamber of a modernized extruder / D.I. Frolov [et al.] // Volga Region Farmland. 2019.No 2 (2). pp. 87–94.

Сведения об авторах

Information about the authors

<p>Фролов Дмитрий Иванович кандидат технических наук доцент кафедры «Пищевые производства» ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет» 440039, г. Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11 Тел.: +7(937) 408-35-28 E-mail: surr@bk.ru</p>	<p>Frolov Dmitriy Ivanovich PhD in Technical Sciences associate professor at the department of «Food productions» Penza State Technological University Phone: +7(937) 408-35-28 E-mail: surr@bk.ru</p>
<p>Потанов Максим Александрович аспирант кафедры «Пищевые производства» ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет» 440045, Пенза, ул. Ульяновская, д. 36, кв. 37 Тел.: +7(962) 473-86-96 E-mail: torrentskachat@mail.ru</p>	<p>Potapov Maxim Alexandrovich postgraduate student of the department «Food productions» Penza State Technological University Phone: +7(962) 473-86-96 E-mail: torrentskachat@mail.ru</p>