

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРЕРАБОТКИ СОЕВОЙ РУШАНКИ В ДВУХШНЕКОВОМ ПРЕСС-ЭКСТРУДЕРЕ

Резюме. Изучено влияние основных параметров процесса переработки соевой рушанки в модернизированном двухшнековом пресс-экструдере: частоты вращения шнековых валов, влажности и температуры поступающего материала. Получены уравнения регрессии для расчета производительности по жмыху и степени отжима масла, а также зависимость для определения мощности привода пресс-экструдера.

Ключевые слова: рушанка соевых семян, двухшнековый пресс-экструдер, уравнения регрессии, мощность привода.

STUDY OF THE PROCESSING PROCESS OF SHELLED SOYBEAN SEEDS IN A TWIN-SCREW PRESS EXTRUDER

Abstract. The influence of the main parameters of the soybean meal processing in a modernized twin-screw press extruder was studied: the rotational speed of the screw shafts, the moisture content, and the temperature of the incoming material. Experimental-statistical models were obtained for calculating the press cake output and the oil pressing degree, as well as a relationship for determining the extruder drive power.

Key words: shelled soybean seeds, twin screw press extruder, regression equations, drive power.

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях производство сбалансированных комбикормов высокого качества достигается благодаря использованию, в частности, продуктов переработки сои — жмыха и шрота. Для устранения антипитательных факторов, таких как ингибитор трипсина, уреазы и другие, применяются соответствующие приемы обработки семян сои, которые обеспечивают инактивацию этих веществ. Достигается это при оптимальном сочетании температурного режима, влажности материала и механического воздействия.

К одному из эффективных способов повышения кормовой ценности соевого жмыха относится термопластическая экструзия, позволяющая при кратковременной тепловой обработке материала инактивировать антипитательные вещества до безопасного уровня [1, 2]. Обычно как необрушенные, так и обрушенные (рушанка) семена сои перерабатывают в одношнековых [3, 4] или двухшнековых пресс-экструдерах с зацепляющимися червяками-валами, расположенными в зоне сжатия, и с сопряженными кулачками, установленными в камере нагрева и обеспечивающими интенсивное измельчение материала [5–7]. Двухшнековые пресс-экструдеры имеют хороший захват и принудительное транспортирование материала, независимо от его свойств,

УДК 664.381.12

Научная статья

DOI 10.69539/2413-287X-2025-02-2-233

ВАЛЕНТИН ВИТАЛЬЕВИЧ ДЕРЕВЕНКО¹,

доктор технических наук, профессор

ORCID: 0009-0002-9546-6198

E-mail: ekotp@ekotp.ru

ВАЛЕРИЯ АНТОНОВНА ДВОРНИКОВА¹,

студент

E-mail: dvornikova_valeriya04@mail.ru

¹ФГБОУ ВПО Кубанский государственный технологический университет (КубГТУ)

350072, Россия, Краснодарский край, г. Краснодар, ул. Московская, д. 2

Поступила в редакцию: 29.01.2025

Одобрена после рецензирования: 04.02.2025

Принята в публикацию: 05.02.2025

UDC 664.381.12

Research article

DOI 10.69539/2413-287X-2025-02-2-233

VALENTIN VITALIEVICH DEREVENKO¹,

Doctor of Technical Sciences, Professor

ORCID: : 0009-0002-9546-6198

E-mail: ekotp@ekotp.ru

VALERIYA ANTONOVNA DVORNIKOVA¹,

Student

E-mail: dvornikova_valeriya04@mail.ru

¹Kuban State Technological University

350072, Russia, Krasnodar region, Krasnodar, st. Moskovskaya, 2

Received by editor office: 01.29.2025

Approved in revised: 02.04.2025

Accepted for publication: 02.05.2025

взаимную очистку червяков, возможность переработки материала с достаточно широким интервалом по влажностной характеристике; характеризуются устойчивостью процесса и незначительным энергопотреблением [6].

Цель работы — изучение влияния параметров соевой рушанки и модернизированного двухшнекового пресс-экструдера ЭПЧ-75 на эффективность его работы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В процессе производственных испытаний типового двухшнекового пресс-экструдера марки ЭПЧ-75 (ПО «Ростов-продмаш») при переработке соевой рушанки были установлены следующие недостатки: неравномерный сток масла по длине зерновых камер, достаточно высокая маслянистость получаемого жмыха и низкий выход масла, что, очевидно, связано с конструктивным несовершенством шнекового вала. Для оценки характера изменения свободного объема шнечков по длине шнекового вала, который характеризует правильность его конструкции [8, 9], были проведены соответствующие замеры. Затем рассчитаны геометрические объемы каждой пары шнечков с учетом их порядкового номера на шнековом валу. В результате была вычислена теоретическая степень сжатия как отношение свободного объема первого и последующих витков для каждой пары шнечков по длине вала. На кривой 3, изображенной на рисунке 1, наблюдается скачкообразное изменение теоретической степени сжатия по длине вала. Она увеличивается на 4, 6 и 9 шнечках, а затем, соответственно, заметно уменьшается. В этом случае не происходит плавного увеличения теоретической степени сжатия по длине прессующего тракта, что и приводит к снижению выхода масла в процессе прессования [8]. Для сравнения: кривая 1 на рисунке 1 отражает теоретическую степень сжатия для разработанного двухшнекового пресс-экструдера МЭЧ-90 [5] — она плавно повышается. При его производственной эксплуатации установлено, что высокая эффективность отжима масла достигается в режиме однократного окончательного отжима (маслоцех ООО «Пром-Инвест», Воронежская область).

В усовершенствованной конструкции экструдера ЭПЧ-75 установлен новый набор шнечков по длине шнековых валов (рис. 2). Это позволило увеличить теоретическую степень сжатия в целом по сравнению с типовой конструкцией ЭПЧ-75 и свело только к одному ее скачку на 6 номере шнечка (кривая 2, рис. 1), в результате эффективность работы двухшнекового пресс-экструдера повысилась. В рабочей зоне при взаимодействии шнечков,

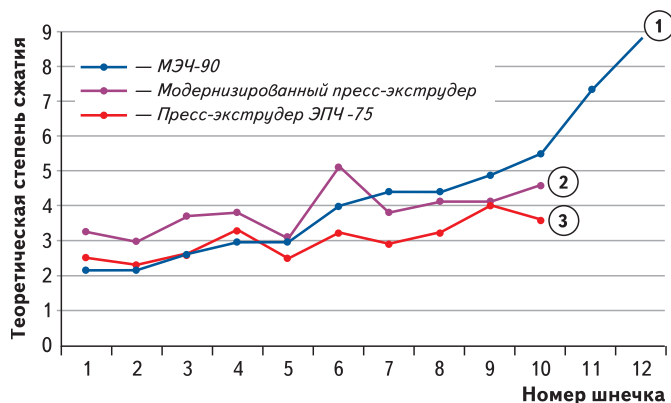


Рис. 1. Зависимость теоретической степени сжатия от номера шнечка по длине вала

расположенных на различных валах с односторонним вращением, происходит разделение потока материала на несколько частей [6]. Один из них движется по восьмиобразной траектории сложного канала, образованного между поверхностями шнечков двух валов, за исключением каналов между их сопрягающимися поверхностями кулачков. Другие два потока перемещаются по круговым траекториям соответственно вокруг каждого вала. Таким образом возникают продольный и поперечный циркуляционные потоки, которые играют определяющую роль в равномерном смешении частиц перерабатываемого материала и в теплоотдаче от внутренней стенки, обогреваемой экструзионной камерой [6]. При этом сдвиговые усилия, равномерно распределенные в зоне отжима масла, преобладают над объемными, что обеспечивает отжим масла при невысоких давлениях [6, 7]. Обратный поток материала возникает в радиальном зазоре между гребнем витка шнека и внутренней поверхностью экструзионной камеры. Жидкая фаза, выделенная в зоне отжима масла, через зазоры между зерновыми пластинами стекает в поддон. Зона выхода жмыха ограничена матрицей с фильерами различной геометрии, обычно они выполнены в виде круглых сквозных отверстий. Для ЭПЧ-75 рабочий диаметр фильеры составляет 8 мм. ➔

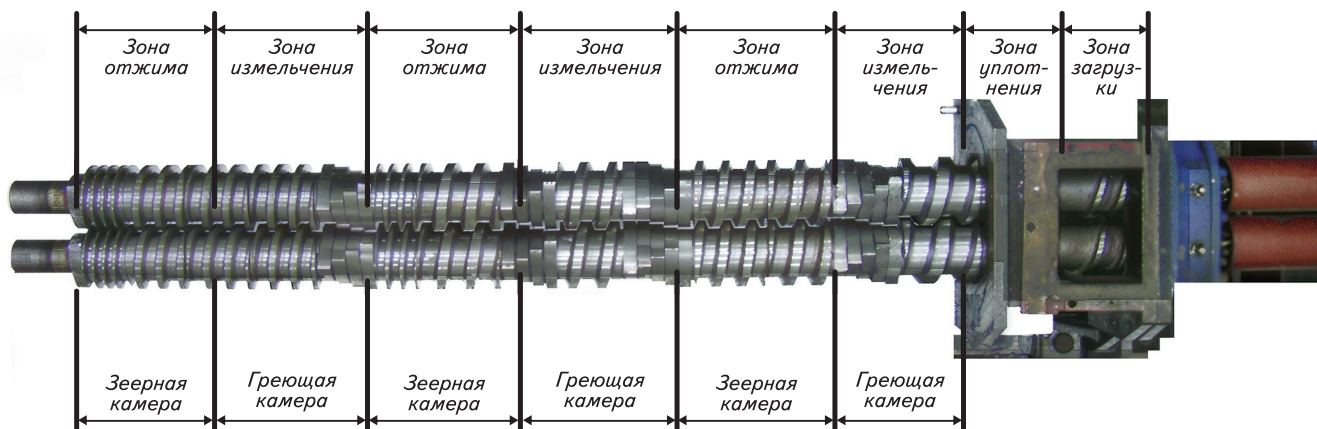


Рис. 2. Фотография шнековых валов модернизированного пресс-экструдера

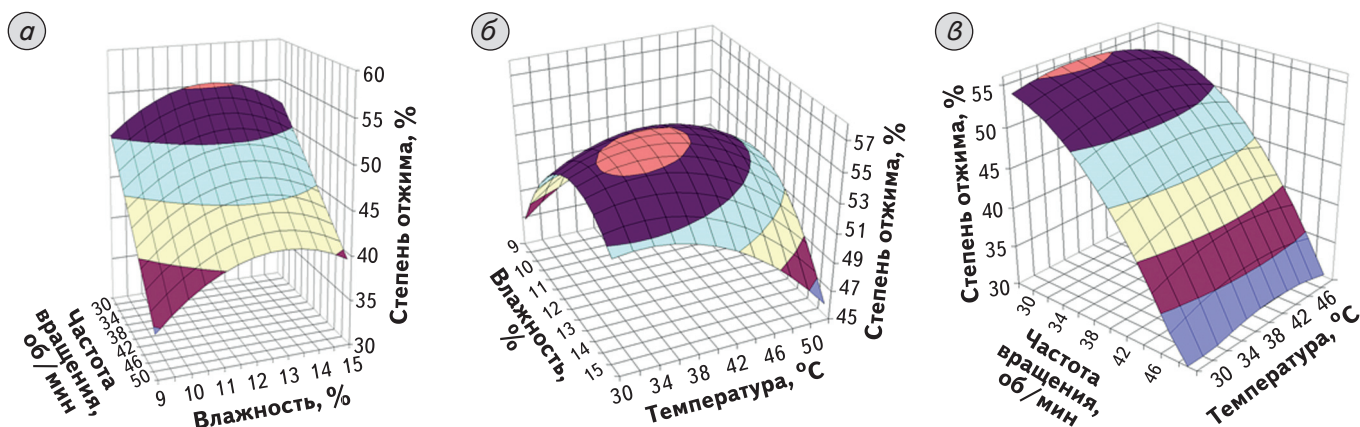


Рис. 3. Зависимость степени отжима масла из соевой рушанки:

а) от начальной влажности материала и частоты вращения валов;

б) от температуры и начальной влажности материала;

в) от частоты вращения шнековых валов и начальной температуры материала

Учитывая сложный механизм термопластической экструзии масличного материала с отжимом масла в двухшнековом пресс-экструдере, исследования основывали на экспериментально-статистическом методе с получением математических моделей, изучением и оценкой степени влияния входящих параметров на степень отжима масла и производительность по жмыху. Статистическая обработка результатов исследований проводилась в программе Microsoft Excel. Определение оптимальных параметров работы двухшнекового пресс-экструдера выполнена с применением «Поиск решения» табличного процессора Microsoft Excel версии 2017.

Экспериментальные исследования осуществлялись в производственных условиях маслоцеха КМП «Авангард» (Краснодарский край) на модернизированном пресс-экструдере марки ЭПЧ-75 по схеме с предварительным центробежным обрушиванием семян сои и кондиционированием рушанки до заданных температуры и влажности [10].

Изучалось влияние на основные показатели эффективности следующих параметров процесса: частоты вращения шнековых валов в интервале 30–50 об/мин, влажности соевой рушанки 10,4–15,8%, ее температуры 32–48°C. Измеряемые выходные параметры: производительность по жмыху (кг/ч), массовый выход масла (кг/ч), масличность и влажность жмыха (%). Расчетные показатели: степень отжима масла (%) и выход жмыха (%).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Подбор параметров уравнений регрессии проводился прямой минимизацией остаточной суммы квадратов отклонений экспериментальных данных, полученных при переработке соевой рушанки на модернизированном двухшнековом пресс-экструдере, и расчетных выходных показателей. После исключения незначимых членов уравнения регрессии имеют следующий вид:

для степени отжима масла

$$Y_{\text{от.}} = 48,23 - 11,83X_1 - 1,68X_2 - 0,46X_3 + 0,64X_1X_2 + 0,68X_1X_3 - 1,5X_2X_3 - 5,1X_1^2 - 3,24X_2^2 - 1,23X_3^2, \quad (1)$$

для производительности пресс-экструдера по жмыху

$$Y_{\text{пр.}} = 90,84 + 9,89X_1 - 0,62X_2 + 0,14X_3 - 0,9X_1X_2 - 1,68X_1X_3 - 0,34X_2X_3 - 2,17X_1^2 - 0,51X_2^2 + 1,58X_3^2, \quad (2)$$

где $X_1 = (n - 40) / 10$ — кодированное значение частоты вращения валов;

$X_2 = (W - 13,1) / 2,7$ — кодированное значение влажности поступающего на переработку масличного материала;

$X_3 = (t - 40) / 8$ — кодированное значение температуры масличного материала.

Уравнения (1) и (2) адекватны с доверительной вероятностью 0,95 по критерию Фишера.

Для расчета затрат мощности (кВт) привода двухшнекового пресс-экструдера при переработке соевой рушанки предлагается следующая зависимость от производительности по жмыху (N):

$$N = 1,17 + 0,0093Y_{\text{пр.}} \quad (3)$$

Интерпретацию нелинейности и межфакторных взаимодействий уравнений регрессии (1, 2) осуществляли в виде графических поверхностей $Y_{\text{отк.}} = f(X_1, X_2)$ [11]. Такая интерпретация учитывает особенности топологии функции отклика, определяет возможность и направление использования экспериментально-статистических моделей, в частности, для оптимизации параметров технологического процесса. Наличие в экспериментально-

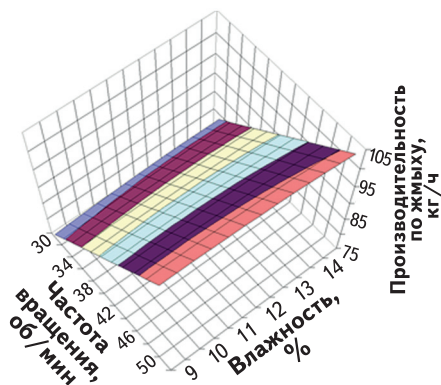


Рис. 4. Зависимость производительности по жмыху как функция попарных влияний

статистических моделях межфакторных взаимодействий и квадратичных эффектов позволяет классифицировать полученные поверхности как фрагменты параболоидов (рис. 3). Как видно, характер изменения поверхностей указывает на существование оптимальных значений для частоты вращения шнековых валов пресс-экструдера и температуры поступающего на переработку соевой рушанки внутри границы варьирования факторов, а по влажности — на нижней границе.

Определили оптимальные технологические режимы при выполнении следующей задачи: максимизировать степень отжима масла $Y_{\text{ст.от.}}(n, W, t)_{\text{max}}$ при ограничениях $M_{\text{мж}}^{\text{min}} \leq M_{\text{мж}}(Y_{\text{ст.от.}}) \leq M_{\text{мж}}^{\text{max}}$, с расчетом оптимальной производительности по жмыху $Y_{\text{пр.}}(n, W, t)$. Результаты расчетов по оптимизации параметров работы двухшнекового пресс-экструдера показали, что для заданной масличности жмыха 12–14% соответствует степень отжима масла 55,5% при оптимальных частоте вращения $n = 30$ об/мин, температуре $t = 38^\circ\text{C}$, влажности $W = 12,4\%$. При этом производительность пресс-экструдера по жмыху составляет 78,2 кг/ч.

На рисунке 3 (а) представлен график зависимости степени отжима масла от начальной влажности соевой рушанки и частоты вращения валов для установленной оптимальной температуры $t = 38^\circ\text{C}$. С увеличением частоты вращения более резко снижается степень отжима масла. В целом такие зависимости свойственны для различных видов маслосодержащего сырья при отжиме масла из него на шнековых прессах. Характер влияния начальной влажности на степень отжима масла менее выражен по сравнению с аналогичной зависимостью при переработке ядровой фракции семян подсолнечника. Это связано со значительно меньшей масличностью соевой рушанки, которая определяет ее упругопластические свойства. Наибольшая степень отжима достигается при максимальных значениях влажности в интервале 11–12,5% и затем плавно снижается. Для оптимальной частоты вращения шнековых валов (30 об/мин) зависимость степени отжима от температуры и влажности поступающей на переработку соевой рушанки показана на рисунке 3 (б). Максимальная степень отжима масла (около 55,4%) достигается при влажности 11,5–12,5% и температуре 36–42°C. При сочетаниях этих технологических параметров, очевидно, формируются оптимальные упругопластические свойства перерабатываемого материала для отжима масла в двухшнековом пресс-экструдере.

Для оптимальной влажности зависимость степени отжима масла от частоты вращения шнековых валов и начальной температуры рушанки соевых семян представлена на рисунке 3 (в). Изменение частоты вращения приводит к резкому изменению степени отжима масла. При температуре свыше 30°C она плавно увеличивается с 52 до 55,5%. Максимальное значение степени отжима приходится на интервал температур от 38 до 40°C , затем наблюдается ее плавное снижение. При переработке на модернизированном пресс-экструдере ЭПЧ-75 повышение начальной температуры соевой рушанки более 50°C ведет к изменению интенсивности окраски получаемого жмыха (от желтого до темно-коричневого) и к увеличению нагрузки на электро-

Литература

1. Изменение качества сои в результате экструдирования. *Biagroferm.ru*
2. Трунова, Л. А. Разработка технологии, обеспечивающей повышение ценности зерна бобовых культур для производства комбикормов: автореф. дис. канд. техн. наук / Л. А. Трунова. — Москва, 2005. — 24 с.
3. Бойко, Л. Я. Экструзионная технология переработки семян сои / Л. Я. Бойко, Л. А. Трунова // Хранение и переработка зерна. — 2004. — № 9. — С. 35–36.
4. Пугачёв, П. М. Оптимальные режимы пресса / П. М. Пугачёв, Н. С. Левина, Л. А. Шалаева // Комбикорма. — 2011. — № 5. — С. 48–49.
5. Патент на полезную модель №18711 РФ «Двухчервячный пресс-экструдер для отжима масла из масличного материала» / Деревенко В. В. // БИМП. 11.04.2001.
6. Толчинский, Ю. А. Экструдеры и двухфазные среды / Ю. А. Толчинский, В. В. Ключкин, В. Н. Герасченко. — Санкт-Петербург: НПО «Масложирпром», 1992. — 575 с.
7. Ключкин, В. В. Особенности обработки хлопкового ядра в двухшнековом экструдере / В. В. Ключкин, И. А. Ем. — Л.: ВНИИЖ, 1990. — 28 с. Деп. В АгроНИИТЭИПП, 19.10.90, № 2313.
8. Масликов, В. А. Технологическое оборудование производства растительных масел / В. А. Масликов. — М.: Пищевая промышленность, 1974. — 439 с.
9. Зарембо, Г. В. Анализ теоретической объемной производительности последовательного ряда шнековых звеньев в процессе различных типов / Г. В. Зарембо // Труды ВНИИЖ. — Л., 1960. — Вып. XX. — С. 32–39.
10. Деревенко, В. В. Оптимальный энерготехнологический комплекс маслопрессового производства / В. В. Деревенко // Масложировая промышленность. — 2001. — № 2. — С. 24–26.
11. Вознесенский, В. А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях / В. А. Вознесенский — М.: Финансы и статистика, 1981. — 263 с.
12. Руководство по технологии получения и переработки растительных масел и жиров., т. 1, кн. 1 / под ред. А. Г. Сергеева. — Л.: ВНИИЖ, 1975. — 728 с.
13. Деревенко, В. В. Влияние параметров процесса микронизации на активность уреазы в соевой рушанке / В. В. Деревенко, В. А. Дворникова // Комбикорма. — 2025. — № 1. — С. 38–41.

двигатель. Такая картина характерна для маслосодержащего материала с пониженной влажностью [12].

Для начальной влажности соевой рушанки, ее оптимальной температуры (38°C) и частоты вращения шнеков получена зависимость производительности по жмыху как функция попарных влияний (рис. 4). Увеличение частоты вращения шнеков в зависимости от влажности и температуры материала способствует повышению производительности двухшнекового пресс-экструдера. Как известно, такой характер изменения производительности аналогичен переработке масличного сырья на маслоотжимных прессах [12]. Следует отметить, что во всех опытах активность уреазы в жмыхе не превышала 0,2 ΔрН, если ее активность в кондиционированной соевой рушанке была не более 0,7 ΔрН [13].

ВЫВОДЫ

При экспериментальных исследованиях процесса переработки соевой рушанки в модернизированном двухшнековом пресс-экструдере получены уравнения регрессии, позволяющие рассчитать степень отжима масла и производительность по жмыху в следующем интервале варьирования параметров: частота вращения валов 30–50 об/мин, влажность поступающего материала 10,4–15,8%, его температура — 32–48°C. Также установлены зависимости для определения потребляемой мощности привода. Полученные результаты рекомендуется использовать для оперативного управления технологическим процессом и разработки двухшнековых пресс-экструдеров для переработки масличного сырья. ■