

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ И РЕЖИМОВ РАБОТЫ ШНЕКОВОГО ЗАГРУЗЧИКА ДЛЯ ПОДАЧИ ЛЬНЯНОЙ КОСТРЫ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНОЙ ОПТИМИЗАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

В. А. ШАРШУНОВ, С. В. КУРЗЕНКОВ, М. В. ЦАЙЦ, Н. С. СЕНТЮРОВ

*УО «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции
и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия»,
г. Горки, Республика Беларусь, 213407, e-mail: nikolay_senturov@rambler.ru*

(Поступила в редакцию 18.06.2026)

В статье представлена расчетно-оптимизационная методика обоснования конструктивных параметров и режимов работы шнекового загрузчика, предназначенного для подачи льняной костры в технологических линиях ее переработки. Разработана система аналитических зависимостей, описывающих производительность, кинематику транспортирования, силы сопротивления движению и энергетические характеристики процесса с учетом физико-механических свойств волокнистого материала. Для комплексной оценки эффективности работы загрузчика предложены критерий транспортируемости и интегральный критерий эффективности, учитывающие производительность, удельные энергозатраты, устойчивость транспортирования и вероятность сводообразования. Выполнена параметрическая оптимизация конструктивных и режимных параметров, проведен анализ чувствительности интегрального критерия эффективности к изменению основных конструктивных и технологических факторов, а также выполнена оценка адекватности разработанной расчетно-оптимизационной методики путем сопоставления полученных результатов с известными теоретическими закономерностями и инженерными рекомендациями. По результатам исследования сформулированы практические рекомендации по выбору рациональных параметров шнекового загрузчика при проектировании оборудования для транспортирования льняной костры. Предложенная методика может быть использована при проектировании и модернизации шнековых загрузчиков для транспортирования льняной костры и других легких волокнистых сельскохозяйственных материалов.

Ключевые слова: *льняная костра, шнековый загрузчик, слабосыпучие волокнистые материалы, математическое моделирование.*

This article presents a calculation and optimization methodology for substantiating the design parameters and operating modes of a screw loader designed for feeding flax shives in processing lines. A system of analytical relationships has been developed that describe the throughput, transport kinematics, resistance forces, and energy characteristics of the process, taking into account the physical and mechanical properties of the fibrous material. To comprehensively assess the loader's performance, a transportability criterion and an integral efficiency criterion are proposed, taking into account throughput, specific energy consumption, transport stability, and the likelihood of bridging. Parametric optimization of design and operating parameters was performed, an analysis of the integral efficiency criterion's sensitivity to changes in key design and process factors was conducted, and the adequacy of the developed calculation and optimization methodology was assessed by comparing the obtained results with known theoretical principles and engineering recommendations. Based on the study's results, practical recommendations were formulated for selecting rational auger loader parameters when designing equipment for transporting flax shives. The proposed methodology can be used in the design and modernization of auger loaders for transporting flax shives and other light fibrous agricultural materials.

Key words: *flax shives, auger loader, low-flow fibrous materials, mathematical modeling.*

Введение

Эффективность технологических линий переработки лубяных культур, в частности производства топливных пеллет из вороха льняной костры, во многом определяется надежностью и стабильностью работы систем дозированной подачи исходного сырья. Ворох льняной костры, являясь легким волокнистым отходом, характеризуется низкой насыпной плотностью (около 120 кг/м³), высокой влагоемкостью и значительным внутренним трением, что приводит к частым нарушениям потока – сводообразованию и зависаниям в бункерах и загрузочных устройствах [1]. В связи с этим задача разработки научно обоснованной методики расчета шнековых загрузчиков для такого специфического материала является актуальной.

Теоретическим и экспериментальным вопросам транспортирования сыпучих и волокнистых материалов шнековыми рабочими органами посвящены работы многих авторов. Значительный вклад в развитие теории винтовых конвейеров внесли А. М. Григорьев, Р. Л. Зенков, И. И. Ивашков, А. О. Спиваковский и другие, заложившие основы определения производительности и мощностных параметров [2, 3]. Однако их исследования в основном ориентированы на зернистые и сыпучие грузы с установившимися свойствами. Позднее, в работах Л. Г. Вайсбурга, В. В. Демьянова и др. были предложены уточненные модели, учитывающие влияние физико-механических свойств материалов на процесс транспортирования [4].

Для волокнистых сельскохозяйственных материалов, таких как ворох льняной костры, отдельные аспекты механического дозирования рассматривались в трудах Ковалева М. М., Петрова В. Г., однако комплексная оптимизация параметров шнека с учетом всех реологических особенностей и критериев надежности (предотвращение сводообразования) в единой методике представлена недостаточно пол-

но [5]. Существующие инженерные расчеты часто используют усредненные коэффициенты, что не позволяет достичь высокой точности при проектировании оборудования для конкретного сырья.

В работах сотрудников УО БГСХА и других учреждений Республики Беларусь рассматривались вопросы механизации процессов уборки и первичной переработки льна [6–8], а также технологические свойства вороха льнокостры как объекта переработки прессованием [9]. Однако вопросы оптимизации параметров шнековых загрузчиков применительно к данному материалу с использованием многокритериальных подходов освещены недостаточно.

Целью данной работы является разработка и верификация математической модели и методики многокритериальной оптимизации параметров шнекового загрузчика вороха льняной костры, обеспечивающей устойчивую подачу с минимальными энергозатратами.

Основная часть

Процесс подачи вороха льняной костры на сетчатый транспортер представляет собой механическое транспортирование слабо сыпучего дисперсного материала посредством винтового рабочего органа. Основной задачей шнекового устройства является обеспечение: равномерной подачи материала; формирования стабильного слоя на транспортере; регулирования производительности; предотвращения образования сводов и локальных перегрузок.

Ворох льняной костры относится к легким волокнистым материалам с низкой насыпной плотностью и повышенной склонностью к зависанию и неравномерному распределению. Вследствие этого эффективность транспортирования определяется не только геометрией шнека, но и реологическими свойствами материала.

Настоящая методика предназначена для инженерного расчета шнекового дозатора, обеспечивающего устойчивую и равномерную подачу вороха льняной костры в технологические линии переработки.

Методика учитывает: реологические свойства вороха льняной костры; влияние геометрии шнека; кинематику транспортирования; энергетические характеристики; условия предотвращения сводообразования; ограничения по устойчивости потока материала.

При этом ворох льняной костры будем рассматривать как легкий слабо сыпучий волокнистый материал с повышенным внутренним трением и склонностью к уплотнению. Для выполнения расчета выполним математическую формализацию задачи (табл. 1):

Таблица 1. Данные математической формализации

Параметр	Обозначение	Единицы для анализа	Единицы в формулах (СИ)
Массовая производительность	Q	кг/ч	кг/с
Масса порции, подаваемой шнеком	$M_{\text{п}}$	кг	кг
Объемная подача устройства загрузки	$V_{\text{ш}}$	м ³ /ч	м ³ /с
Объем межвиткового пространства шнека	$V_{\text{м.пр.}}$	м ³	м ³
Площадь межвиткового пространства	$S_{\text{м.пр.}}$	м ²	м ²
Внешний диаметр шнека	$D_{\text{ш}}$	м	м
Диаметр вала шнека	$d_{\text{в.ш}}$	м	м
Шаг витка шнека	$h_{\text{вит.ш.}}$	м	м
Частота вращения шнека	$n_{\text{ш}}$	об/мин	об/с
Поступательная скорость перемещения материала	$v_{\text{м}}$	м/с	м/с
Насыпная плотность	ρ	кг/м ³	кг/м ³
Средний размер частиц	$l_{\text{ч}}$	мм	м
Влажность материала	W	%	—
Коэффициент внутреннего трения	$f_{\text{в.тр.}}$	—	—
Угол внутреннего трения	$\varphi_{\text{в.тр.}}$	град	рад
Критический угол наклона шнека	$\alpha_{\text{кр}}$	град	рад
Коэффициент заполнения межвиткового пространства	ψ_z	—	—
Коэффициент осевого перемещения	$\lambda_{\text{о.п.}}$	—	—

Схему подающего устройства можно представить следующим образом рис. 1. Для обеспечения устойчивого транспортирования вороха льняной костры рациональной является схема низкооборотного одновального шнекового дозатора с умеренным углом наклона и увеличенным межвитковым объемом. Применение одновального шнека обусловлено следующими факторами: простотой конструкции; высокой надежностью; устойчивостью работы при переменной загрузке; возможностью плавного регулирования подачи; низкой чувствительностью к изменению свойств материала. Для производительности до 1000 кг/ч одновальный шнек может обеспечивать достаточную транспортирующую способность без значительного усложнения конструкции. Применение одновального шнека обусловлено следующими факторами: простотой конструкции; высокой надежностью; устойчивостью работы при переменной загрузке; возможностью плавного регулирования подачи; низкой чувствительностью к изменению свойств материала. Для производительности до 1000 кг/ч одновальный шнек может обеспечивать достаточную транспортирующую способность без значительного усложнения конструкции.

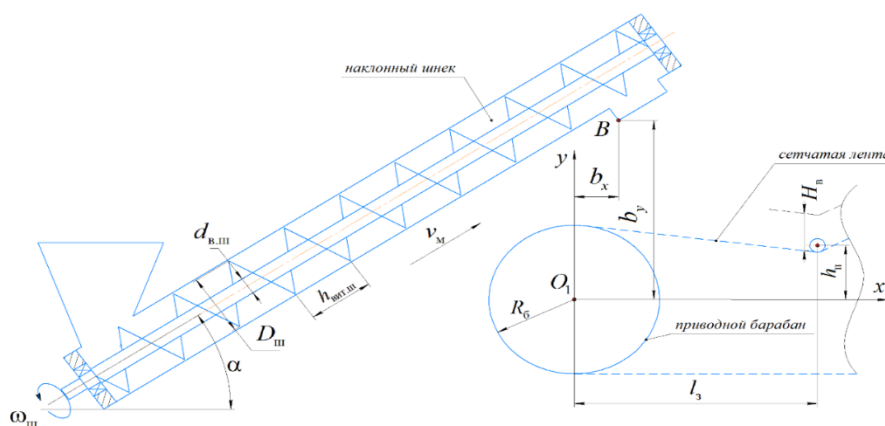


Рис. 1. Схема взаиморасположения подающего льянокостру устройства и сетчатого транспортера

В рассматриваемой ситуации предпочтителен низкооборотный режим работы шнека, поскольку при увеличении частоты вращения: возрастает центробежное удержание материала; усиливается уплотнение волокнистой массы; увеличивается внутреннее трение; возрастает вероятность разрушения устойчивого потока. Кроме того, высокие скорости приводят к возникновению динамических пульсаций подачи и повышенному износу рабочих поверхностей.

Для волокнистых материалов важным фактором является удерживающая способность шнека. При большом шаге витка: материал начинает проскальзывать; возрастает обратное осыпание; ухудшается дозирование. Поэтому предпочтение отдано уменьшенному шагу витка шнека, обеспечивающему: повышение осевой устойчивости потока; уменьшение проскальзывания; снижение влияния силы тяжести при наклонной установке; улучшение равномерности подачи. Одновременно чрезмерное уменьшение шага также нежелательно, поскольку приводит к росту сопротивления перемещению и повышенному уплотнению материала.

Для подачи вороха льняной костры предпочтительным является применение ленточного шнека. Ленточный виток обеспечивает: уменьшение площади контакта материала с рабочими поверхностями; снижение трения; уменьшение уплотнения волокнистой массы; частичное самоочищение межвиткового пространства; снижение вероятности зависания материала. Дополнительным преимуществом является улучшение аэрации транспортируемой массы, что особенно важно при повышенной влажности льянокостры. Сплошной виток для подобных материалов менее эффективен, поскольку способствует накоплению и прессованию волокнистой массы.

Угол наклона шнека оказывает определяющее влияние на устойчивость транспортирования. При увеличении угла наклона: возрастает составляющая силы тяжести, направленная против движения материала; усиливается обратное осыпание; уменьшается коэффициент заполнения; ухудшается равномерность подачи. Для вороха льняной костры критический угол наклона шнека при транспортировании составляет приблизительно: $25-30^\circ$, поэтому обеспечение в подающем устройстве угла наклона порядка $15-20^\circ$ гарантирует: устойчивое перемещение материала; минимизацию обратного осыпания; приемлемые энергозатраты; стабильную производительность.

Ворох льняной костры обладает высокой склонностью к сводообразованию вследствие: волокнистой структуры; механического зацепления частиц; повышенного внутреннего трения. Для предотвращения зависаний размер загрузочного окна должен значительно превышать характерный размер частиц материала. Это условие обеспечивает: свободное поступление материала; снижение вероятности образования сводов; стабилизацию коэффициента заполнения шнека; повышение надежности работы дозатора.

На основании вышесказанного можно сделать вывод, что конструктивная схема шнекового дозатора эффективного для загрузки вороха льняной костры на ленточный транспортер должна представлять собой низкооборотный одновальный ленточный шнек с уменьшенным шагом витка, умеренным углом наклона и увеличенной загрузочной зоной. Это позволит обеспечить: устойчивое транспортирование слабо сыпучего волокнистого материала; снижение вероятности сводообразования; уменьшение энергозатрат; повышение равномерности дозирования; стабильную производительность порядка до 1000 кг/ч ; надежность работы в условиях изменяющихся свойств льянокостры.

Приведем методику расчета предлагаемого подающего устройства.

Подача материала осуществляется за счет заполнения межвиткового объема шнека. Теоретический объем и массу одной межвитковой камеры можно установить по формулам:

$$V_{м.пр} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_{ш}^2 - d_{в.ш}^2) \cdot h_{вит.ш}, \quad (1)$$

$$M_{\Pi} = \rho \cdot \psi_3 \cdot k_{\text{упл}} \cdot V = \frac{\pi}{4} \cdot \rho \cdot \psi_3 \cdot k_{\text{упл}} (D_{\text{ш}}^2 - d_{\text{в.ш}}^2) \cdot h_{\text{вит.ш}}, \quad (2)$$

где ψ_3 – коэффициент заполнения межвиткового пространства (для слабо сыпучего материала принимается $\psi_3 = 0,4 \dots 0,6$ [10]); $k_{\text{упл}}$ – коэффициент уплотнения материала (для слабо сыпучего материала принимается $k_{\text{упл}} = 1,05 \dots 1,25$ [11]).

При вращении шнека материал совершает сложное винтовое движение. Теоретически за один оборот материал должен перемещаться вдоль оси шнека на величину шага витка $h_{\text{вит.ш}}$. Однако вследствие проскальзывания реальная скорость оказывается меньше, поэтому поступательная скорость порции материала определяется по зависимости:

$$v_{\text{м}} = \lambda \cdot n_{\text{ш}} \cdot h_{\text{вит.ш}}, \quad (3)$$

где λ – коэффициент, учитывающий проскальзывание материала (для сыпучих грузов обычно принимается $0,5 \dots 0,8$ [12]).

Объемная подача шнека определяется объемом порции материала, транспортируемого через его поперечное сечение за единицу времени, а массовая подача – массой порции материала, транспортируемого через его поперечное сечение за единицу времени. Их можно определить по формулам:

$$Q = V_{\text{ш}} \cdot \rho = \frac{\pi}{4} \cdot \psi_3 \cdot C \cdot (D_{\text{ш}}^2 - d_{\text{ш}}^2) \cdot v_{\text{м}} \cdot \rho, \quad (4)$$

где C – коэффициент, учитывающий угол наклона шнека.

Угол наклона оказывает существенное влияние на производительность. При его увеличении возрастает обратное смещение материала; снижается степень заполнения межвиткового пространства; ухудшается равномерность подачи. Изучение вопроса влияния угла наклона подающего шнекового устройства на объемную и массовую подачу показало [13, 14], что показатель изменения подачи подчиняется зависимости $C(\alpha) = \cos^{\chi}(\alpha)$, где χ – эмпирический показатель, зависящий от свойств материала. Для льняной костры и других волокнистых слабо сыпучих материалов снижение подачи происходит существенно быстрее, чем для зернистых материалов, поэтому этот показатель может варьировать от 1,3 до 2, а его значение от угла α и показателя степени χ представлено на рис. 2.

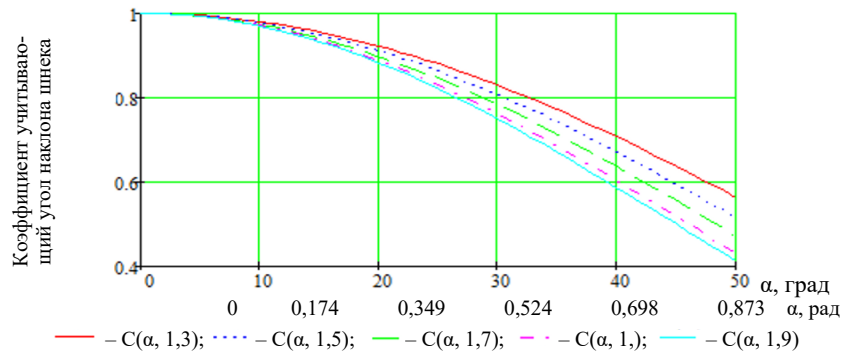


Рис. 2. Зависимость коэффициента C , учитывающего угол наклона шнека α и показатель χ , характеризующий свойства транспортируемого материала

Анализ характера изменения подачи материала наклонным шнеком показывает, что при $\alpha = 0^\circ$ можно обеспечить максимальную подачу; при $\alpha = 20\text{--}30^\circ$ происходит снижение подачи на 12–20 %; при $\alpha > 40^\circ$ резко возрастает обратное осыпание, что значительно снижает подачу. Это подтверждает правильность подходов к проектированию подающего устройства.

Условие начала обратного осыпания материала

Интенсивное обратное осыпание начинается тогда, когда сила тяжести, действующая вдоль оси шнека, становится сопоставимой с силой трения материала о витки. Условие предельного равновесия материала можно представить как: $m \cdot g \cdot \sin(\alpha_{\text{кр}}) = f_{\text{в.тр}} \cdot m \cdot g \cdot \cos(\alpha_{\text{кр}})$, что после преобразований запишется в виде $\alpha_{\text{кр}} = \arctg(f_{\text{в.тр}})$. Для вороха льняной костры коэффициент трения составляет $f_{\text{в.тр}} = 0,45\text{--}0,7$, тогда критический угол $\alpha_{\text{кр}}$ находится в диапазоне: $\alpha_{\text{кр}} = 24\text{--}35^\circ$. В данных диапазонах изменения угла наклона шнека резко возрастает обратное осыпание; нарушается равномерность подачи; увеличиваются пульсации потока; снижается коэффициент заполнения межвиткового пространства. С учетом этого можно предположить, что зависимость производительности с учетом критического угла может быть описана формулой:

$$Q_{\alpha} = Q_0 \cdot \left(1 - \frac{\tg(\alpha)}{\tg(\alpha_{\text{кр}})} \right), \quad (5)$$

где Q_0 – подача материала при нулевом угле наклона шнека, кг/с; Q_{α} – подача материала при угле наклона шнека α , кг/с.

Для комплексной оценки управляемости транспортировки через шнековый загрузчик льнокостры введем обобщенный безразмерный комплексный критерий:

$$\Psi_{\text{тр}} = \frac{f_{\text{в.тр}} \cdot k_{\text{упл}} \cdot P_{\text{св}}}{\cos(\beta)}, \quad (6)$$

где $\Psi_{\text{тр}}$ – критерий транспортируемости; $\beta = \beta_0 + k_w W$ – угол естественного откоса (принимается $35\text{--}50^\circ$ с переводом в рад), рад; β_0 – угол естественного откоса абсолютно сухого или эталонного материала (принимается $30\text{--}35^\circ$ с переводом в рад), рад; k_w – коэффициент влияния влажности на угол естественного откоса; W_M – влажность материала, %; $k_{\text{упл}} = \rho/\rho_0$ – коэффициент уплотнения материала ($k_{\text{упл}} = 1,2 \dots 2$); ρ_0 – насыпная плотность материала до его уплотнения, кг/м^3 ; $P_{\text{св}} = 1 - e^{-a_{\text{ф.с.}} \cdot (K_{\text{кр}}/K_{\text{св}})^\xi}$ – вероятность сводообразования (для вороха льняной костры принимается $a_{\text{ф.с.}} = 120\text{--}350$ характеризует фракционный состав и шероховатость частиц, а $\xi = 1,2\text{--}1,6$ характеризует нелинейность процесса; $K_{\text{св}} = \frac{D_0}{l_q}$ – параметр, характеризующий

образование устойчивого свода; D_0 – размер выпускного отверстия, м.

Для устойчивого истечения вороха льняной костры из отверстия необходимо, чтобы $K_{\text{св}} > K_{\text{кр}}$. Для волокнистых материалов $K_{\text{кр}} = 6\text{--}10$. Если условие не выполняется, вероятность образования сводов резко возрастает.

При $\Psi_{\text{тр}} < 1$ – материал транспортируется устойчиво; $\Psi_{\text{тр}} > 1$ – возрастает вероятность зависаний и нарушения подачи.

Смоделируем энергетические характеристики шнековой подачи вороха льняной костры. Полное сопротивление движению материала в шнеке можно определить как

$$F_{\Sigma} = F_{\text{тр}} + F_{\text{вн}} + F_{\alpha} + F_{\text{упл}}, \quad (7)$$

где $F_{\text{тр}} = f_{\text{в.тр}} \cdot \rho \cdot g \cdot V$ – сила трения материала о шнек и кожух, Н; $F_{\text{вн}} = A \cdot (c_m + \text{tg}(\varphi_{\text{в.тр}}))$ – трение при взаимодействии частиц материала, Н; $F_{\alpha} = \rho \cdot g \cdot V \cdot \sin(\alpha)$ – сопротивления подъему материала при наклоне шнека, Н; $F_{\text{упл}} = k_{\text{упл}} \cdot \varepsilon \cdot V$ – сопротивление, связанное с уплотнением волокнистой массы, Н.

В рассматриваемом случае тяговое усилие преобразуется в крутящий момент, который можно записать следующим образом:

$$M = F_{\Sigma} \frac{D_{\text{ш}}}{2}. \quad (8)$$

Мощность, необходимую для вращения шнека определим как

$$N = \frac{2\pi \cdot n_{\text{ш}} \cdot M}{\eta} = \frac{\pi \cdot F_{\Sigma} \cdot D_{\text{ш}} \cdot n_{\text{ш}} \cdot M}{\eta}, \quad (9)$$

где N – мощность привода, Вт; η – КПД привода.

Энергетическая эффективность (Вт·ч/кг) транспортирования оценивается удельными энергозатратами:

$$E_{\text{уд}} = \frac{N}{Q} = \frac{\pi \cdot F_{\Sigma} \cdot D_{\text{ш}} \cdot n_{\text{ш}} \cdot M}{\eta \cdot Q}. \quad (10)$$

Данная формула позволяет оценить энергетическую эффективность транспортирования вороха льняной костры. Чем меньше удельные энергозатраты, тем эффективнее процесс транспортирования материала. В качестве критерия эффективности можно использовать параметр, комплексно учитывающий: производительность; энергозатраты; стабильность подачи; вероятность сводообразования; устойчивость транспортирующего потока. В качестве интегральной оценки подачи материала можно использовать безразмерную величину:

$$\Phi_{\text{опт}} = \frac{g \cdot H_{\text{т}}}{k_n \cdot E_{\text{уд}} \cdot P_{\text{св}}}, \quad (11)$$

где $k_n = (Q_{\text{max}} - Q_{\text{min}})Q_{\text{ср}}$ – коэффициент неравномерности подачи; $H_{\text{т}}$ – высота транспортирования материала, м.

Максимизация данной функции будет соответствовать оптимальному режиму работы системы подачи вороха льняной костры.

Результаты параметрической оптимизации.

Проведена параметрическая оптимизация с использованием инструмента «Поиск решения» в среде электронных таблиц Microsoft Excel. В качестве варьируемых параметров приняты: длина шнека ($2 \leq L_3 \leq 6$), внешний диаметр ($0,16 \leq D_{\text{ш}} \leq 0,22$), диаметр вала ($0,067 \leq d_{\text{в.ш}} \leq 0,087$), шаг витка шнека ($0,125 \leq h_{\text{вит.ш}} \leq 0,173$), частота вращения шнека ($0,417 \leq n_{\text{ш}} \leq 1,0$), угол наклона шнека ($0 \leq \alpha \leq 0,349$), размер загрузочного отверстия ($0,128 \leq D_0 \leq 0,219$).

Расчетные параметры принимались в пределах: $0,275 \leq Q_n \leq 0,281$; $0,05 \leq v_m \leq 0,15$; $1,5 \leq H_{\text{тр}} \leq 1,5$;

В качестве критериев оптимизации были приняты $k_{св} \geq 8$, $1 - P_{св} \leq 1$, $N \leq 500$, $E_{уд} \leq 900$, $0 \leq \psi_{тр} \leq 1$. Целевая функция – по зависимости (4). Оценку процесса выполняли по критериям: удельные энергозатраты на загрузку материала (10), комплексная оценка управляемости транспортировкой (6), интегральная оценка подачи материала шнековым рабочим органом (11).

В результате поиска решений при подаче в диапазоне 200–1000 кг/ч установлены значения удельных энергозатрат, мощности на привод и секундной подачи (рис. 3).

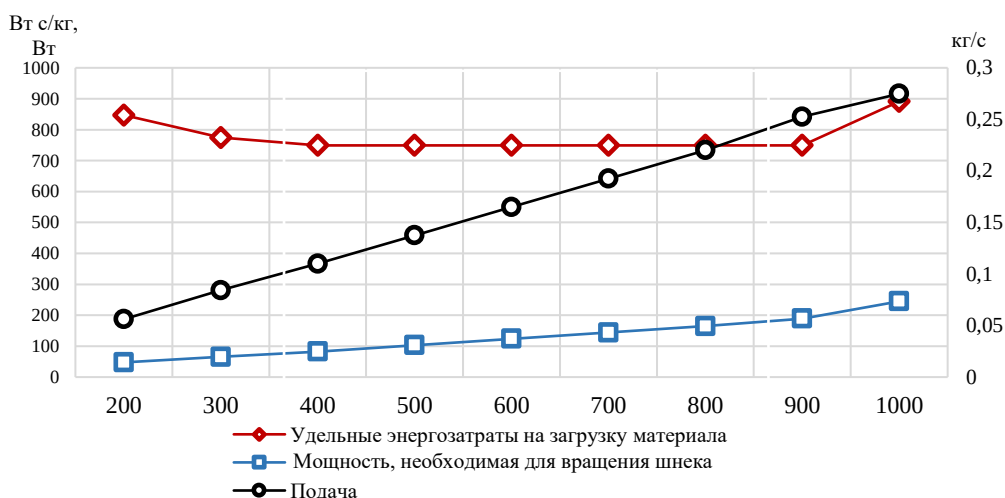


Рис. 3. Зависимости удельных энергозатрат, мощности на привод и секундной подачи материала от производительности

Анализ графической зависимости (рис. 3) позволяет выделить диапазон 400...900 кг/ч рациональных значений производительности при заданных конструктивных параметрах шнекового загрузчика для подачи льняной костры. Для оценки устойчивости предложенной математической модели (11) и определения наиболее значимых факторов выполнен анализ чувствительности интегрального критерия эффективности транспортирования табл. 2.

Таблица 2. Результаты анализа чувствительности интегрального критерия эффективности транспортирования к изменению параметров модели

Параметр	Диапазон изменения	Изменение $\Phi_{\text{опт}}$
Диаметр шнека	0,16 – 0,22 м	+ 34 %
Шаг витка	0,70 – 1,00 D	+ 18 %
Частота вращения	25 – 70 об/мин	+ 27 %
Коэффициент трения	0,45 – 0,70	– 22 %
Плотность	90 – 150 кг/м³	+ 12 %

Исследование проводилось методом последовательного варьирования одного параметра при неизменных остальных. В качестве базового режима принимались оптимальные параметры, полученные в результате оптимизации: $D_{ш} = 0,22$ м; $h_{\text{вит}} = 0,198$ м; $n_{ш} = 50$ об/мин; $f_{\text{в.тр}} = 0,55$; $\rho = 120$ кг/м³. Каждый параметр изменялся в пределах ± 20 %, после чего вычислялось новое значение критерия $\Phi_{\text{опт}}$. Максимальное значение интегрального критерия соответствовало диапазону плотности 110–130 кг/м³, характерному для рыхлого вороха льняной костры после измельчения. Анализ чувствительности показал, что наибольшее влияние на интегральный критерий оказывают диаметр шнека и частота вращения, тогда как изменение плотности транспортируемого материала в исследованном диапазоне оказывает существенно меньшее влияние. Полученные результаты позволяют определить приоритетность выбора конструктивных параметров при проектировании шнековых загрузчиков.

Оценка адекватности предложенной расчетно-оптимизационной модели выполнялась путем сопоставления полученных расчетных зависимостей с известными теоретическими положениями и инженерными рекомендациями, приведенными в работах по расчету шнековых транспортирующих устройств.

Установлено, что полученные в результате оптимизации конструктивные и режимные параметры находятся в диапазонах, рекомендуемых для транспортирования легких волокнистых материалов. Так, оптимальное отношение шага витка к диаметру шнека составляет около 0,9, что соответствует известным рекомендациям по проектированию шнековых транспортирующих устройств. Рациональная частота вращения шнека (25–58 об/мин) также находится в области низкооборотных режимов, обеспечивающих устойчивое перемещение волокнистых материалов без интенсивного их уплотнения.

Полученные расчетные зависимости отражают известные закономерности процесса транспортирования: увеличение диаметра шнека приводит к росту производительности; повышение частоты

вращения сопровождается увеличением производительности и мощности привода; увеличение угла наклона снижает подачу вследствие усиления обратного осыпания материала; рост коэффициента внутреннего трения приводит к увеличению сопротивления перемещению и энергетических затрат. Все указанные тенденции согласуются с классическими представлениями о работе шнековых транспортирующих устройств и результатами исследований, приведенными в работах [2–5, 10, 12–14]. Таким образом, разработанная математическая модель корректно воспроизводит основные физические закономерности процесса транспортирования вороха льняной костры и может использоваться при инженерном проектировании и оптимизации параметров шнековых загрузчиков.

Заключение

В результате проведенных исследований разработана методика оптимизации шнекового загрузчика для специфического волокнистого материала – ворох льняной костры. Ключевым отличием предложенного подхода является совместное использование инженерных расчетов с многокритериальной оптимизацией, включающей показатели надежности подачи (вероятность 0,05 исключения сводообразования) и качества управления потоком. Установлено, что для производительности 400...900 кг/ч оптимальными являются следующие параметры: внешний диаметр шнека – 0,22 м, шаг витка – 0,198 м, частота вращения – 0,42...0,97 об/с (25...58 об/мин), угол наклона – около 20°. При данных параметрах обеспечивается низкая вероятность образования сводов (менее 0,05), удовлетворительная управляемость потоком (в пределах допустимых значений) и высокое значение интегрального критерия $\Phi_{\text{опт}} = 1,96$, что соответствует минимальным удельным энергозатратам (около 750 Вт·с/кг).

Полученные результаты позволяют рекомендовать при проектировании шнековых загрузчиков для подачи вороха льняной костры:

- применять расчетно-оптимизационную методику, основанную на совместном учете производительности, удельных энергозатрат, устойчивости транспортирования и вероятности сводообразования;
- использовать низкооборотный одновальный ленточный шнек с отношением шага витка к диаметру 0,9, обеспечивающий устойчивую подачу волокнистого материала;
- при выборе конструктивных и режимных параметров ориентироваться на максимум интегрального критерия эффективности, позволяющего обеспечить рациональное сочетание производительности, энергетической эффективности и надежности транспортирования.

Предложенные рекомендации могут быть использованы при проектировании и модернизации шнековых загрузчиков для технологических линий переработки вороха льняной костры и других легких волокнистых сельскохозяйственных материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ковалев, М. М. Транспортирующие машины для переработки льняного сырья / М. М. Ковалев, В. Г. Петров. – М.: Машиностроение, 2015. – 280 с.
2. Зенков, Р. Л. Машины непрерывного транспорта / Р. Л. Зенков, И. И. Ивашков, Л. Н. Колобов. – М.: Машиностроение, 1987. – 432 с.
3. Григорьев, А. М. Винтовые конвейеры / А. М. Григорьев. – М.: Машгиз, 1972. – 184 с.
4. Вайсбург, Л. Г. Моделирование процессов пневмотранспорта и дозирования сыпучих материалов / Л. Г. Вайсбург, В. В. Демьянов // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Машиностроение. – 2018. – № 2. – С. 45–56.
5. Петров, В. Г. Исследование подачи льняной костры шнековыми питателями / В. Г. Петров, А. И. Сидоренко // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2020. – № 7. – С. 23–27.
6. Шаршунов, В. А. Обоснование параметров установки зажимного транспортера и деки обмолачивающего устройства линии первичной переработки / В. А. Шаршунов, С. В. Курзенков, В. А. Левчук, М. В. Цайц // Вестник БГСХА. – 2017. – № 3. – С. 180–187.
7. Цайц, М. В. Методика выбора параметров и режимов работы льноуборочного комбайна с роторно-бильным аппаратом / М. В. Цайц, В. А. Левчук, А. Н. Чайчиц и др. // Вестник БГСХА. – 2021. – № 4. – С. 184–191.
8. Шаршунов, В. А. Результаты производственных испытаний и экономическая оценка применения роторно-бильно-высесывающего устройства на льноуборочном комбайне / В. А. Шаршунов, В. А. Левчук, М. В. Цайц, С. В. Курзенков // Вестник БГСХА. – 2023. – № 2. – С. 114–120.
9. Шаршунов, В. А. Технологические свойства вороха льнокустарника как объекта переработки прессованием / В. А. Шаршунов, Н. С. Сентюров, М. В. Цайц // Вестник БарГУ. Сер. Технические науки. – 2025. – Вып. 18. – С. 30–38.
10. Транспортирующие машины: учебник для студентов вузов / В. И. Галкин [и др.]; под общ. ред. В. И. Галкина. – Москва: Машиностроение, 2014. – 411 с.
11. Примеры расчета подъемно-транспортирующих машин и механизмов сельскохозяйственного назначения: учебно-методическое пособие для студентов учреждений высшего образования / Министерство сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь, Белорусский государственный аграрный технический университет; сост.: А. Н. Орда [и др.]. – Минск: БГАТУ, 2014. – 184 с.
12. Зенков, Р. Л. Машины непрерывного транспорта: учебник для студентов вузов по специальности «Подъемно-транспортные машины и оборудование» / Р. Л. Зенков, И. И. Ивашков, Л. Н. Гнутов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Машиностроение, 1987. – 432 с.
13. Кузьмин, А. В. Справочник по подъемно-транспортным машинам / А. В. Кузьмин, Д. В. Марочкин. – М.: Альянс, 2018. – 504 с.
14. Гевко, Б. М. Определение параметров и режимов работы винтовых конвейеров / Б. М. Гевко. – Львов: Выща школа, 1986. – 128 с.