

ОБОСНОВАНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ЗОНЫ ЗАГРУЗКИ УСТРОЙСТВА ПРЕССОВАНИЯ МАТЕРИАЛА

Новиков Владимир Васильевич¹, кандидат технических наук, профессор кафедры «Сельскохозяйственные машины и механизация животноводства»

Ермолаева Джамиля Рашидовна¹, аспирант кафедры «Сельскохозяйственные машины и механизация животноводства»

¹ ФГБОУ ВО «Самарская государственная сельскохозяйственная академия»

Коновалов Владимир Викторович², доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения»

² ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет»

¹ 446442, Самарская обл., п.г.т. Усть-Кинельский, ул. Спортивная, 8а тел.: 89272023787; e-mail: grecov_as@mail.ru

² 440039, Пенза, проезд Байдукова / ул. Гагарина, 1а/11

Ключевые слова: производительность, пресс, конический направитель, шнек.

Представлен пресс для отжима жидкости из растительного сырья, пресс позволяет улучшить качество извлекаемой жидкости, повысить производительность. Приведены аналитические зависимости производительности прессы с конусным направителем в зоне загрузки от конструктивных параметров загрузочного устройства. Проведенный анализ позволил выявить выражения, позволяющие обосновать целесообразность применения двухзаходного шнека у конического направителя в зоне загрузки прессы.

Введение

В сельскохозяйственном производстве широко применяют материалы, которые в процессе переработки подвергают прессованию. При этом часто ставится задача не просто уплотнения частиц материала, но и отведения излишней влаги. Решение этой задачи возможно с помощью прессы, имеющего в зоне загрузки многозаходный шнек.

У прессы давления прессование зависит от подачи материала (производительность прессы). При увеличении выгрузного отверстия производительность прессы увеличивается, однако при этом снижается создаваемое давление [1].

Увеличение подачи материала в зоне загрузки дает возможность поддерживать технологическое давление в зоне прессования. При этом загрузочное устройство должно обеспечивать необходимое давление и на входе материала в зону прессования. Таким образом, при оптимизации параметров зоны загрузки прессы требуется предварительно определить влияние конструктивных параметров этой зоны на подачу материала и создаваемое давление.

При пропускной способности зоны загрузки большей, чем пропускная способность прессы, давление в конце зоны загрузки повышается. Это требует большей мощности на привод шнека [2].

В связи с изложенным выше поставлена цель исследований - теоретический анализ влияния конструктивных параметров шнека, расположенного в зоне загрузки материала, на максимальную производительность прессы и создаваемое давление в этой зоне.

Объекты и методы исследований

Объект исследований - процесс воздействия многозаходного шнека с коническим валом на материал в зоне загрузки прессы. Методика исследований подразумевает теоретическое обоснование влияния конструктивных параметров шнека на максимально возможную подачу шнека зоны загрузки при максимальном давлении внутри материала.

Пресс (рис. 1) включает в себя корпус 1 с загрузочным бункером 2. Внутри корпуса 1 установлен активный рабочий орган, со-

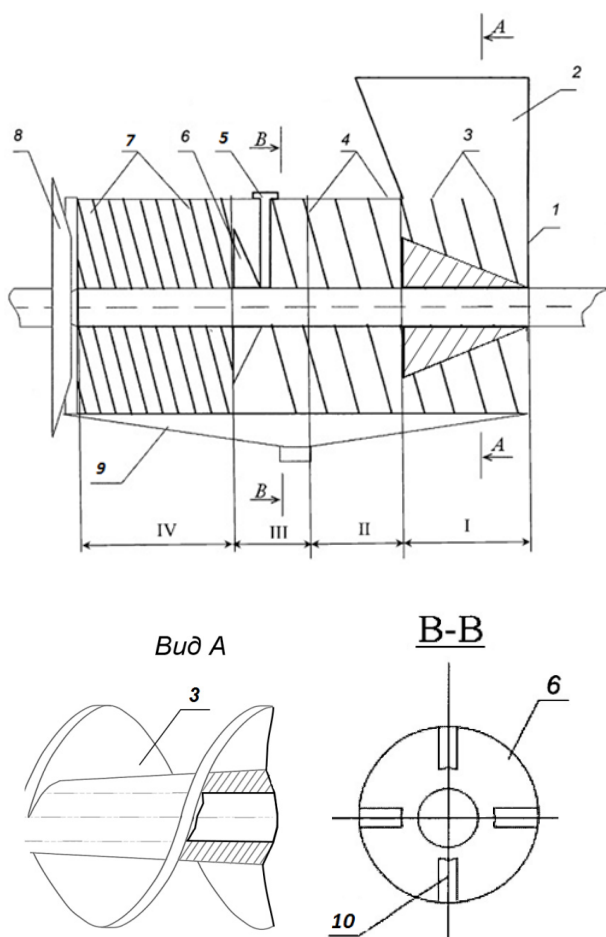


Рис. 1 - Шнековый пресс для отжима влаги из сельскохозяйственных материалов (движение материала справа налево):

1 – корпус; 2 – загрузочный бункер; 3 – подающий шнек; 4 – прессующий шнек; 5 – разрыхлитель мезги; 6 – конусная втулка; 7 – шнек; 8 – регулятор давления; 9 – влагосборник; I – зона загрузки материала, II – зона сжатия, III – зона стабилизации давления, IV – зона интенсивного сжатия

стоящий из трех соосно установленных на приводном валу шнеков: подающего шнека 3 (конусного направителя), выполненного в виде шнека с конической направляющей; прессующего шнека 4, имеющего на последнем витке прямоугольные радиальные прорезы 10; и шнека 7, выполненного с уменьшением шага витка в направлении выгрузки материала. При вращении рабочего органа образуются четыре зоны переработки продукта (зона загрузки материала – I, зона его сжатия – II, зона стабилизации давления – III, зона интенсивного сжатия материала – IV).

Подающий двухзаходный шнек 3 имеет направляющую в виде конусной втулки. При этом диаметр большего основания конусной втулки равен внешнему диаметру заднего витка прессующего шнека.

Разработанная конструкция пресса позволяет постепенно увеличивать давление сжатия материала, что способствует лучшему отжиму из него жидкости. Конечная влажность материала изменяется регулировкой зазора между корпусом 1 и конусным регулятором давления 8. Отводимая жидкость собирается во влагосборнике 9.

Методика включает в себя теоретическое обоснование параметров рабочих органов зоны загрузки материала, которые в последующем проверяются экспериментальными исследованиями. Оптимизация параметров предполагает использование критерия, учитывающего производительность пресса и создаваемое шнеком давление.

Результаты исследований

При подаче материала от внешнего дозирующего устройства с производительностью Q_d материал захватывается витками шнека и подается через конический направитель на отжим. При этом теоретически возможная подача шнека в зоне вершины конуса $Q_{вк}$ будет превышать значения Q_d . Это необходимо для обрушения частиц и предотвращения сводообразования в загрузочной горловине. В данном случае часть межвиткового пространства будет свободна от материала, т.е. степень заполнения межвиткового пространства ψ на данном участке меньше единицы. По мере движения материала к основанию конического направителя материал заполняет всё межвитковое пространство ($\psi = 1$), а затем начинается интенсивный отвод жидкости из материала при его сжатии. В зоне загрузки требуется обеспечить условие $\psi = 1$, т.е. подача материала шнеком у основания конуса $Q_{ок}$ должна соответствовать производительности дозирующего устройства ($Q_{ок} = Q_d$, либо быть немного ниже) [3]. С учетом сжатия материала зона загрузки должна обеспечивать необходимый начальный подпор (давление). При $\psi \geq 1$ материал не будет успевать проходить возле основания конуса, образуя

затор и переполняя загрузочный бункер. В этом случае работа технологической линии невозможна.

На последующих участках пресса происходит отвод части жидкости, поэтому подача в направлении движения материала снижается. Однако из-за изменения параметров шнека на этих участках условие сжатия материала будет также соблюдено. С учетом подачи материала при загрузке Q_d и отвода жидкости конический регулятор давления 8 будет занимать соответствующее положение с учетом загрузки электродвигателя и обеспечения требуемой влажности продукта. В случае увеличения подачи материала внутри пресса поднимается давление, соответственно растет количество отведенной жидкости, однако для предотвращения заклинивания шнека и перегрева электродвигателя потребуется своевременное некоторое отведение регулятора давления 8 от корпуса пресса.

Определим теоретическую зависимость движения материала в прессе от числа заходов шнека и шага витков. Рассмотрим участок пресса у конусного направителя, где материал заполняет все пространство шнека (т.е. $\psi = 1$). Пусть в конечном сечении, проведенном через большее основание конуса, выделяется промежуточный продукт (рис. 2).

Выделим на участке полного заполнения материалом конического направителя элементарное сечение толщиной dl , через которое за время dt проходит усредненная масса материала dm .

Усредненная мгновенная подача материала, кг/с, при равномерной загрузке

$$Q = dm / dt, \quad (1)$$

где dm – текущее мгновенное среднее значение массы материала в элементарном сечении, кг; dt – время выведения из конического направителя материала массой dm , с.

Учитывая, что:

$$m = \rho V, \text{ или } dm = \rho dV,$$

где ρ – плотность материала, кг/м³; V – объем материала массой m , м³; dV – объем

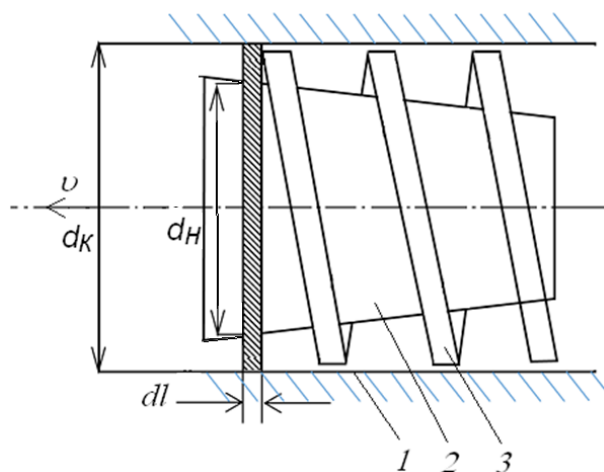


Рис. 2. - Конусный направитель зоны загрузки (движение материала справа налево): 1 – корпус шнекового пресса; 2 – конусная втулка; 3 – шнек; dl – толщина элементарного поперечного слоя материала возле конусного направителя, соответствующая элементарной длине шнека, м; dk – диаметр корпуса шнека; dH – диаметр конусной втулки в зоне элементарного поперечного слоя материала, v – осевая скорость материала

материала массой dm , находящегося в элементарном сечении толщиной dl , м³.

Тогда выражение (1) приобретает вид:

$$Q = \frac{d(\rho V)}{dt} = \frac{d\rho}{dt} \cdot V + \rho \frac{dV}{dt}, \quad (2)$$

Поскольку зона загрузки конструктивно не позволяет создавать высокое давление, то первым слагаемым можно пренебречь. При постоянном давлении ($\rho = \text{const}$) и отсутствии отвода из материала жидкости плотность материала неизменна. Поэтому выражение (2) можно записать в следующем виде:

$$Q = \rho \cdot \frac{dV}{dt}. \quad (3)$$

Представив объем материала как $dV = S \cdot dl$, можно получить следующее выражение при неизменной площади поперечного сечения материала S :

$$Q = \rho \cdot S \frac{dl}{dt} = \rho \cdot S \cdot v, \quad (4)$$

где S – площадь текущего поперечного

сечения конического направителя у элементарной пластины материала, м^2 ; v – мгновенная осевая скорость материала в выбранном поперечном сечении направителя, м/с .

При меняющейся площади сечения подача, кг/с ,

$$Q = \rho \cdot \frac{d(S \cdot l)}{dt} = \rho \cdot l \cdot \frac{dS}{dt} + \rho \cdot S \cdot \frac{dl}{dt}, \quad (5)$$

где dS – изменение площади S , м^2 .

Величина S представляет собой площадь материала в элементарном бесконечно тонком кольцевом зазоре между наружной поверхностью конуса и корпусом шнека, м^2 :

$$S = \pi(d_K^2 - d_H^2) / 4, \quad (6)$$

где d_K , d_H – текущие диаметры корпуса шнека и конического направителя в зоне элементарного сечения материала соответственно, м .

Площадью, занимаемой витками шнека, можно пренебречь ввиду ее малого значения.

Мгновенная скорость в сечении, м/с ,

$$v = \frac{Q}{\rho \cdot S}, \quad (7)$$

Следовательно, увеличение подачи и снижение площади поперечного сечения материала повышает осевую скорость перемещения материала. При этом в зоне загрузки материала его плотность существенно не изменяется.

В то же время при свободном перемещении максимальная осевая скорость материала, м/с ,

$$v = \frac{\pi d_K \cdot \text{tg} \alpha}{T}, \quad (8)$$

где α – угол подъема винтовой линии шнека, рад. ; T – время одного оборота шнека, с .

Тангенс угла подъема винтовой линии, рад. :

$$\text{tg} \alpha = \frac{t}{\pi \cdot d_K} = \frac{z \cdot t_1}{\pi \cdot d_K}, \quad (9)$$

где t – ход шнека, м ; z – число заходов шнека; t_1 – шаг винта шнека, м .

После преобразований получим выражение для определения максимальной осевой скорости перемещения материала:

$$v = \frac{\omega \cdot d_K}{2} \cdot \text{tg} \alpha = \frac{z \cdot t_1 \cdot \omega}{2 \cdot \pi}, \quad (10)$$

где ω – угловая скорость вращения шнека, рад/с .

Следовательно, при увеличении угловой скорости вращения шнека ω и угла α подъема винтовой линии шнека (и, соответственно, увеличении шага шнека) будет повышаться скорость осевого перемещения материала, что, в свою очередь, приведет к увеличению подачи (производительности) устройства.

Максимальная производительность шнека на участке загрузки при постоянной плотности материала

$$Q_{\text{MAX}} = \frac{\rho \cdot \pi(d_K^2 - d_H^2)}{4} \cdot \frac{z \cdot t_1 \cdot \omega}{2 \cdot \pi} = \frac{\omega \cdot \rho \cdot \pi \cdot (d_K^2 - d_H^2) \cdot z \cdot t_1}{8 \cdot \pi}, \quad (11)$$

То есть при прочих равных условиях максимальная производительность шнека растет с увеличением числа заходов шнека и шага винта.

Создаваемое в прессе давление пропорционально осевой силе. На создаваемое давление, а соответственно и на плотность материала влияют:

- накопление (подвод) материала шнеком, которое больше всего зависит от частоты вращения направителя [4, 5, 6];
- конусность направителя [7, 8];
- число заходов шнека [9].

Окружная сила F_t , создаваемая шнеком, взаимосвязана с осевой силой F_a [10]:

$$F_t = F_a \cdot \text{tg}(\alpha + \varphi). \quad (12)$$

где φ – угол трения материала о корпус устройства, рад .

Осевая сила, Н ,

$$F_a = \frac{F_t}{\text{tg}(\alpha + \varphi)}. \quad (13)$$

Давление внутри материала, которое можно создать шнеком элементарной длины при отсутствии проворачивания материала в корпусе шнека, можно определить, используя следующие выражения:

$$\begin{cases} F_a = p \cdot S = \pi \cdot p \cdot (d_k^2 - d_H^2) / 4 \\ F_t = p \cdot S = p \cdot \Delta \ell \cdot \pi \cdot d_k \cdot f = \pi \cdot p \cdot \Delta \ell \cdot d_k \cdot \operatorname{tg}(\varphi) \end{cases}$$

Из этой системы уравнений выразим давление, после чего приравняем полученные выражения:

$$\begin{cases} p = \frac{F_a}{\pi \cdot (d_k^2 - d_H^2) / 4} ; \\ p = \frac{F_t}{\pi \cdot \Delta \ell \cdot d_k \cdot \operatorname{tg}(\varphi)} \end{cases} \cdot \frac{F_t}{\pi \cdot \Delta \ell \cdot d_k \cdot \operatorname{tg}(\varphi)} = \frac{F_a}{\pi \cdot (d_k^2 - d_H^2) / 4} \quad (14)$$

После ряда преобразований получим:

- тангенс угла винтовой линии

$$\operatorname{tg}(\alpha) = \frac{1 - (\operatorname{tg}(\varphi) \cdot (d_k^2 - d_H^2))}{\operatorname{tg}(\varphi) \cdot (4 \cdot \Delta \ell \cdot d_k \cdot \operatorname{tg}(\varphi))} - \frac{(d_k^2 - d_H^2) \cdot \operatorname{tg}(\alpha)}{\operatorname{tg}(\varphi) \cdot (4 \cdot \Delta \ell \cdot d_k \cdot \operatorname{tg}(\varphi))} ;$$

$$\operatorname{tg}(\alpha) = \frac{1 - (\operatorname{tg}(\varphi) \cdot (d_k^2 - d_H^2))}{4 \cdot \operatorname{tg}(\varphi)^2 \cdot \Delta \ell \cdot d_k + (d_k^2 - d_H^2)} ;$$

- максимальное значение элементарной длины шнека

$$\Delta \ell = \frac{1 - (\operatorname{tg}(\varphi) \cdot (d_k^2 - d_H^2))}{4 \cdot \operatorname{tg}(\varphi)^2 \cdot \operatorname{tg}(\alpha) \cdot d_k + (d_k^2 - d_H^2)} ; \quad (15)$$

- давление, создаваемое шнеком элементарной длины

$$p = \frac{F_t}{\pi \cdot \Delta \ell \cdot d_k \cdot \operatorname{tg}(\varphi)} = \frac{F_t}{\pi \cdot d_k \cdot \operatorname{tg}(\varphi)} \cdot \frac{4 \cdot \operatorname{tg}(\varphi)^2 \cdot \operatorname{tg}(\alpha) \cdot d_k + (d_k^2 - d_H^2)}{1 - (\operatorname{tg}(\varphi) \cdot (d_k^2 - d_H^2))} ,$$

или

$$p = \frac{F_t}{\pi \cdot d_k \cdot \operatorname{tg}(\varphi)} \cdot \frac{4 \cdot \operatorname{tg}(\varphi)^2 \cdot \frac{z \cdot t_1}{\pi} + (d_k^2 - d_H^2)}{1 - (\operatorname{tg}(\varphi) \cdot (d_k^2 - d_H^2))} = \frac{F_t \cdot \operatorname{tg}(\arctg(\frac{z \cdot t_1}{\pi \cdot d_k}) + \varphi)}{\pi \cdot d_k \cdot \operatorname{tg}(\varphi)} \cdot \frac{4 \cdot \operatorname{tg}(\varphi)^2 \cdot \frac{z \cdot t_1}{\pi} + (d_k^2 - d_H^2)}{1 - (\operatorname{tg}(\varphi) \cdot (d_k^2 - d_H^2))} .$$

Следовательно, создаваемое шнеком давление зависит от условия отсутствия проворачивания материала в корпусе шнека (окружной силы F_t), угла подъема винтовой линии (числа заходов шнека z и шага t_1 винта), а также от диаметра шнека d_k . Увеличение числа заходов шнека и шага винта приводит к возрастанию давления.

С другой стороны, создаваемое витками шнека давление препятствует повороту самого шнека, т.е. для вращения шнека следует приложить вращающий момент $T_{кр}$. Из предыдущей формулы получим зависимость давления от вращающего момента:

$$p = \frac{T_{кр} \cdot 2 \cdot 4 \cdot \operatorname{tg}(\varphi)^2 \cdot \frac{z \cdot t_1}{\pi} + (d_k^2 - d_H^2)}{d_k \cdot \pi \cdot d_k \cdot \operatorname{tg}(\varphi) \cdot (1 - (\operatorname{tg}(\varphi) \cdot (d_k^2 - d_H^2)))} \quad (16)$$

Выразим из формулы (16) вращающий момент, Н·м,

$$T_{кр} = \frac{p \cdot \pi \cdot d_k^2 \cdot \operatorname{tg}(\varphi) \cdot (1 - (\operatorname{tg}(\varphi) \cdot (d_k^2 - d_H^2)))}{8 \cdot \operatorname{tg}(\varphi)^2 \cdot \frac{z \cdot t_1}{\pi} + (d_k^2 - d_H^2)} \quad (17)$$

Мощность, Вт, на привод шнека элементарной длины:

$$N = \omega \cdot T_{кр} = \frac{\pi \cdot \omega \cdot p \cdot d_k^2 \cdot \operatorname{tg}(\varphi) \cdot (1 - (\operatorname{tg}(\varphi) \cdot (d_k^2 - d_H^2)))}{8 \cdot \operatorname{tg}(\varphi)^2 \cdot \frac{z \cdot t_1}{\pi} + (d_k^2 - d_H^2)} \quad (18)$$

Следовательно, при постоянном давлении шнека на материал увеличение числа заходов шнека и шага винта увеличивает требуемый крутящий момент, т.е. затраты энергии.

Таким образом, полученные зависимости отражают имеющееся противоречие: чем больше число заходов шнека и шаг его витков, тем больше и возможная подача материала, больше и максимальное давление, создаваемое шнеком. Однако при этом возрастают вращающий момент и требуемая на привод мощность. Для создания необходимого давления в конце зоны загрузки материала необходимо, чтобы подача материала шнеком в зоне загрузки была больше, чем подача всего пресса.

Выводы

Для улучшения работы шнекового пресса предлагается использовать многозаходный (как один из вариантов - двухзаходный) шнек в зоне загрузки пресса. Увеличение числа заходов шнека и шага его витков увеличивает подачу материала, а при пропускной способности зоны загрузки большей, чем пропускная способность пресса, и создаваемое давление. Уменьшение пространства между конусной втулкой и корпусом устройства (увеличение d_H) повышает создаваемое шнеком давление, однако снижает подачу материала.

Библиографический список

1. Раувендааль, К. Экструзия полимеров / Пер. с англ. под ред. А.Я. Малкина. – СПб.: Профессия, 2008. – 768 с.
2. Курочкин, А.А. Научное обеспечение актуального направления в развитии пищевой термопластической экструзии. / А.А. Ку-

рочкин, П.К. Воронина, В.М. Зимняков, А.Л. Мишанин, В.В. Новиков, Г.В. Шабурова, Д.Н. Фролов. – Прага: 2015. – 185 с.

3. Обертышев, А.И. Исследование влияния загрузки и некоторых параметров загрузочных устройств на работу винтовых транспортёров сельскохозяйственного назначения: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук / А.И. Обертышев. – Саратов, 1972. – 25 с.

4. Новиков, В.В. Исследование рабочего процесса и обоснования параметров пресс-экструдера для приготовления карбамидного концентрата: Дисс. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / В.В. Новиков. – Саратов: СИМСХ, 1981. – 157 с.

5. Новиков, В. В. Теория и расчет одношнекового пресс-экструдера. – Самара, 2009. – 127 с.

6. Новиков, В.В. Определение производительности пресс-экструдера с коническим направителем / В.В. Новиков, И.Л. Орсик, И.В. Успенская // Эксплуатация автотракторной техники: опыт, проблемы, инновации,

перспективы: Сборник статей II Международной научно-практической конференции. – Пенза: РИО ПГСХА, 2015.- С.. 43 – 49.

7. Коновалов, В.В. Определение подачи цилиндрического шнекового пресса / В.В. Коновалов, В.В. Новиков, Д.В. Беляев, Л.В. Иноземцева // Нива Поволжья. - 2010. - № 2. - С. 51-56.

8. Орсик, И.Л. О влиянии конусности направителя на продвижение смеси в пресс-экструдере // Нива Поволжья. – № 3(32). – 2014. – С. 73 – 78.

9. Пат. № 131948 Российская Федерация, МПК7 А23К1/00, В02С13/00. Экструдер для приготовления кормовой массы / В.В. Новиков, В.В. Коновалов, И.Л. Орсик, А.Л. Мишанин; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО Самарская ГСХА. – № 2013112063/13; заявл. 18.03.13; опубл. 10.09.13. - Бюл. № 25. – 5 с.

10. Прикладная механика / В.В. Волков, В.Ю. Зайцев – Пенза: Изд-во ПГТА, 2012. – 130 с.