

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ ВИНТОВЫХ КОНВЕЙЕРОВ В ЗАДАЧАХ НЕПРЕРЫВНОГО ТРАНСПОРТА СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

Кожевников В.А.

Приволжский государственный университет путей сообщения, Самара

Ключевые слова: винтовой конвейер, шнек, сыпучий материал, производительность, коэффициент заполнения, угол наклона, заклинивание кусков.

Аннотация. На основе математического моделирования процесса перемещения сыпучего груза в винтовом конвейере получены аналитические зависимости производительности от геометрических и кинематических параметров. Выведены условия предотвращения закупорки желоба, обоснованы эмпирические коэффициенты заполнения и ограничения по углу наклона. Предложены расчётные соотношения для выбора диаметра винта по крупности кусков, согласованные с табличными данными. Результаты позволяют перейти от интуитивного подбора к обоснованному проектированию винтовых конвейеров.

ANALYTICAL JUSTIFICATION OF SCREW CONVEYOR PARAMETER SELECTION IN CONTINUOUS BULK MATERIAL TRANSPORT PROBLEMS

Kozhevnikov V.A.

Volga State University of Railway Transport, Samara

Keywords: screw conveyor, auger, bulk material, productivity, filling coefficient, inclination angle, particle jamming.

Abstract. Based on mathematical modeling of bulk material movement in a screw conveyor, analytical dependences of productivity on geometric and kinematic parameters are obtained. Conditions for preventing chute clogging are derived, empirical filling coefficients and inclination angle limitations are substantiated. Calculation relationships for selecting screw diameter based on particle size, consistent with tabular data, are proposed. The results allow a transition from intuitive selection to justified design of screw conveyors.

Винтовые конвейеры применяются для горизонтального и наклонного транспортирования пылевидных, зернистых и мелкокусковых грузов. Несмотря на довольно простую конструкцию, физические процессы в желобе шнека сложны: материал подвергается интенсивному перемешиванию, сдвиговым деформациям, трению о желоб и винтовую поверхность, а также затягиванию в зазор между кромкой винта и желобом. Практические рекомендации по выбору конвейера (таблицы коэффициентов заполнения, соотношения диаметра винта и крупности кусков) носят в основном эмпирический характер, поэтому больший интерес могут представлять рекомендации полученные из фундаментальных уравнений механики сыпучей среды.

Построим математическую модель движения груза в конвейере, получим аналитические выражения для производительности, критических углов наклона и условий заклинивания кусков, на их основе которых обоснуем методику выбора основных параметров.

Рассмотрим горизонтальный винтовой конвейер с крытым полукруглым желобом (рис. 1). За один оборот винта лопасть проталкивает вдоль оси объём материала, ограниченный поверхностью винта и желобом.

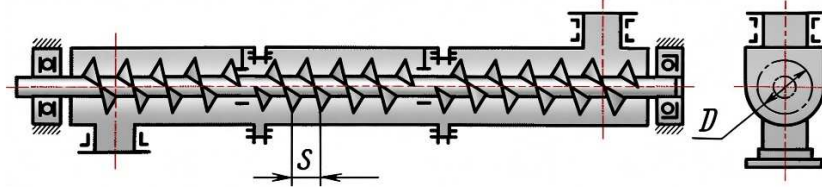


Рис. 1. Схема горизонтальный винтового конвейера

В классических литературных источниках [1, 2] объёмная производительность ($\text{м}^3/\text{ч}$) записывается как:

$$Q = 60 \cdot (D^2 - d_v^2) \cdot S \cdot n \cdot \psi \cdot C, \quad (1)$$

где D – наружный диаметр винта (м); d_v – диаметр вала винта (м); S – шаг винта (м); n – частота вращения (об/мин); ψ – коэффициент заполнения (доля поперечного сечения желоба, занятая материалом); C – поправочный коэффициент на наклон ($C = 1$ для горизонтального).

В этой формуле ψ входит в первой степени – считается, что объём материала пропорционален степени заполнения сечения. Это удобно для практических расчётов, но при малых ($\psi < 0,3$) наблюдаются отклонения из-за проскальзывания материала относительно винта.

Для высокоабразивных, плохосыпучих или слеживающихся грузов групп IV и V (таблица 1) эффективность транспортирования падает быстрее. Эксперименты показывают [3], что в этих условиях производительность лучше описывается квадратичной зависимостью:

$$Q = 60 \cdot \frac{\pi}{4} (D^2 - d_v^2) S n \psi^2 C. \quad (2)$$

При малом ψ материал не только не заполняет сечение, но и проскальзывает по винтовой поверхности, уменьшая эффективный шаг. Дальнейшее изложение будем вести по наиболее распространённой формуле (1), но при выборе ψ для групп IV-V следует занижать его значения согласно таблице 1, что частично имитирует квадратичный эффект [4].

Величина ψ зависит от физико-механических свойств груза: угла естественного откоса, коэффициента внутреннего трения, абразивности и способности к слеживанию. Для стационарного потока в горизонтальном шнеке уравнение равновесия элементарного объёма сыпучей среды в желобе (проекция на ось x) имеет вид:

$$\frac{dp}{dx} = \rho g \sin \beta - \frac{2\tau}{R_c}, \quad (3)$$

где p – давление в транспортируемом материале; ρ – насыпная плотность транспортируемого материала; β – угол наклона конвейера; τ – касательное напряжение на стенке желоба; R_c – гидравлический радиус.

Интегрирование (3) с граничными условиями (нулевое давление на свободной поверхности) даёт максимальную высоту слоя, при которой не

происходит закупорки. В результате получается зависимость допустимого ψ от отношения коэффициента трения материала о желоб μ к тангенсу угла внутреннего трения $\tan\varphi$:

$$\psi = \psi_0 \cdot \exp\left(-\alpha \cdot \frac{\mu}{\tan\varphi}\right), \quad (4)$$

где $\psi_0 \approx 0,45$ – максимальное значение для легко сыпучих грузов; α – эмпирическая константа; μ – коэффициент трения материала о желоб; φ – угол внутреннего трения. Для практики удобно использовать дискретные значения ψ по пяти группам грузов (табл. 1).

Табл. 1. Коэффициенты заполнения в зависимости от характеристик груза

Группа	Коэффициент заполнения ψ	Характеристика и примеры грузов
I	0,45	Легкие, мелкие, сыпучие, неабразивные: угольная пыль, мука, известь-пушонка (0,48-0,64 т/м ³)
II	0,38	Неабразивные, мелкозернистые с пылью: зерно, древесные опилки (0,64-0,80 т/м ³)
III	0,31	Неабразивные, полуабразивные, зернистые или мелкокусковые: мелкий уголь, сахар (0,64-1,20 т/м ³)
IV	0,25	Полуабразивные и абразивные, мучнистые и мелкокусковые: цемент, гипс, известь (0,80-1,60 т/м ³)
V	0,125	Очень абразивные, кусковые или вязкие тонким слоем: зола, кокс, летучая пыль.

Примерное расположение груза в желобе для каждой группы иллюстрирует рисунок 2 (чем ниже ψ , тем больше свободного пространства).

При наклонном транспортировании вверх ($\beta > 0$) продольная составляющая силы тяжести препятствует движению. Коэффициент C в формулах (1) и (2) учитывает снижение производительности.

Частица материала, находящаяся на поверхности винта, не будет ссыпаться вниз через витки, если угол подъема конвейера β меньше угла трения материала о желоб φ :

$$\beta < \varphi.$$

При $\beta \rightarrow \varphi$ производительность стремится к нулю. Аналитическое выражение для C можно получить из условия равновесия частицы на наклонной плоскости:

$$C = \frac{\tan\varphi - \tan\beta}{\tan\varphi}, \quad (5)$$

Для большинства сыпучих грузов $\varphi = 25^\circ \dots 35^\circ$. При $\beta = 20^\circ$ и $\varphi = 30^\circ$: $\tan 30^\circ = 0,577$, $\tan 20^\circ = 0,364$, тогда $C = (0,577 - 0,364)/0,577 \approx 0,37$. Это соответствует практическому правилу: при наклоне конвейера более 20° производительность резко падает. Транспортирование становится невозможно, когда при $\beta \geq \varphi$ коэффициент $C = 0$.

Для углов $\beta \leq 10^\circ$ влияние незначительно, и часто принимают $C \approx 1$.

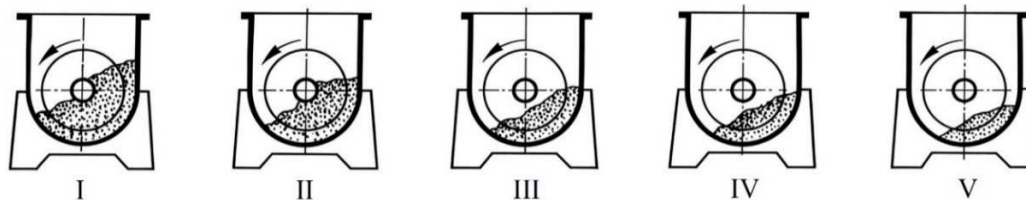


Рис. 2. Примерное расположение груза в желобе для пяти групп материала

Одной из частых причин забивания конвейера является заклинивание крупных кусков между наружной кромкой винта и внутренней поверхностью желоба. В отличие от радиального зазора (обычно 1-5 мм), который не может пропустить кусок, проблема связана с тем, что кусок, попав в межвитковое пространство, упирается одновременно в стенку желоба и в винт. Поэтому необходимо, чтобы диаметр винта был достаточно велик по сравнению с максимальным размером куса d_{max} .

Для рядового (неоднородного) груза, где куски имеют произвольную форму, условие свободного прохождения записывается как:

$$D \geq k \cdot d_{max}, \quad (6)$$

где D – наружный диаметр винта; k – эмпирический коэффициент (для сортированного груза $k = 2...3$; для рядового груза $k = 3...5$).

В таблице 2 приведены максимально допустимые размеры кусков d для каждого типоразмера винта в зависимости от однородности груза. Вычисление отношения D/d для однородного груза даёт значения от 10 до 12 (например $500/45 \approx 11$), что значительно превышает теоретический минимум $k = 3...5$. Это объясняется принятым производителями запасом надёжности.

Табл. 2. Соотношение между диаметром винта, углом наклона и крупностью кусков

Диаметр винта D , мм	150	200	250	300	400	500	600
Однородный груз (80%)	15	18	22	25	35	45	50
Угол наклона β , град.	15	15	15	12	10	8	5
Неоднородный груз (до 15%)	40	50	65	75	100	125	150
Угол наклона β , град.	20	20	20	20	18	15	11

При проектировании винтового конвейера диаметр винта выбирается как максимальное из двух значений: из условия производительности (1) или (2); из условия крупности кусков (6) с использованием таблицы 2. Причем в отличие от ранних исследований, здесь не используется диаметр вала d_g – он не участвует в образовании зазора «винт-желоб».

Из приведённых уравнений следует, что для корректного расчёта конвейера необходимо знать не только требуемую производительность, но и ряд параметров груза и условий эксплуатации. Именно они составляют основу опросного листа завода-изготовителя. Ниже приведён типовой перечень параметров, указываемых в нем для заказа винтового конвейера:

- 1) назначение машины, краткое описание технологического процесса;
- 2) характеристика груза: наименование; насыпная плотность ρ (т/м³); гранулометрический состав и размер куска d_{max} (мм); влажность; угол

естественного откоса; температура; форма кусков (шаровидная, цилиндрическая, произвольная); особые свойства (химическая агрессивность, взрывоопасность, абразивность, липкость, слеживаемость и т.д.);

3) производительность ($\text{м}^3/\text{ч}$): максимальная, номинальная; планируемое повышение производительности;

4) время работы в сутки и в году; необходимые межремонтные сроки и продолжительность ремонтов;

5) технические требования к машине: длина транспортирования; угол наклона β ; места загрузки и разгрузки; необходимость применения специальных материалов; эскиз установки с привязкой к оборудованию;

6) характеристика места установки (помещение или открытая площадка, окружающая среда, допустимые нагрузки на опорные конструкции);

7) необходимость обеспечения сохранности формы и чистоты груза (например, для пищевых продуктов).

8) дополнительные требования заказчика.

Полученная аналитическая модель связывает основные параметры винтового конвейера (диаметр D , шаг S , частота вращения n , коэффициент заполнения ψ , поправка на наклон C) с производительностью и условиями безотказной работы. Получены критерии выбора диаметра по крупности кусков и предельному углу наклона.

Представленные выражения способны превратить эмпирические таблицы в форму строгих инженерных рекомендаций, а предложенный подход может быть расширен на иные режимы работы, учёт вибрации и энергопотребления.

Список литературы

1. Зенков Р.Л., Ивашков И.И., Колобов Л.Н. Машины непрерывного транспорта. – М.: Машиностроение, 1987. – 432 с.
2. Григорьев А.М. Винтовые конвейеры. – М.: Машиностроение, 1972. – 184 с.
3. Хальфин М.Н. Винтовой конвейер с канатным рабочим органом: монография. – Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2011. – 98 с.
4. Новширванов А.Г., Желтов В.П. Винтовые и спирально-винтовые конвейеры: учебное пособие. – Казань: КГТУ, 2007. – 188 с.

Сведения об авторе:

Кожеевников Вадим Александрович – к.т.н., доцент, доцент кафедры ВХНТК.