

## ГОРНОЕ МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 622.6

### ОПТИМИЗАЦИЯ КОНТУРА ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ НАСЫПНОЙ МАССЫ ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРА

А. А. Ордин<sup>1,2</sup>, А. М. Никольский<sup>1</sup>, М. А. Грищенко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,

E-mail: ordin@misd.ru, Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия

<sup>2</sup>Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий,

просп. Академика Лаврентьева, 6, 630090, г. Новосибирск, Россия

Изложена постановка задачи оптимизации контура поперечного сечения насыпной горной массы и кинематических параметров ленточного конвейера. Приведено аналитическое решение по определению оптимального угла наклона боковых роликов и контура поперечного сечения насыпной массы на ленте. Показано влияние угла естественного откоса на изменение оптимального контура поперечного сечения насыпной горной массы на ленте конвейера. Приведены результаты оптимизации скорости движения и ускорения ленты конвейера в пусковой период. Установлено влияние угла наклона боковых роликов на силу трения качения.

*Шахта, ленточный конвейер, насыпная горная масса, контур поперечного сечения, ролики, кинематические параметры, производительность, сила трения, оптимизация*

DOI: 10.15372/FTPPI20240113

EDN: WFCFVB

В многочисленных исследованиях [1 – 12], посвященных теоретическим расчетам технических параметров ленточных конвейеров, отсутствует постановка и решение задачи оптимизации контура поперечного сечения насыпной массы на ленте. Решение этой задачи влияет на кинематические и силовые параметры ленточного конвейера, а также на условия его эксплуатации.

Кинематические параметры ленточного конвейера — скорость движения ленты и ее ускорение в пусковой период — тесно связаны с контуром поперечного сечения насыпной массы на ленте конвейера. Увеличение площади поперечного сечения насыпной массы при постоянной пропускной способности конвейера позволяет снизить скорость движения ленты и ее ускорение в пусковой период. Пропускная способность  $Q$  стационарно установленного в шахте ленточного конвейера задается максимально возможной производительностью  $Q_{\max}$  очистного забоя и определяется по формуле [1]:

$$Q = 60\gamma Skv \geq Q_{\max}, \quad (1)$$

из которой находится требуемая скорость движения ленты:

$$v \geq \frac{Q_{\max}}{60\gamma Sk}; \quad 0 < v < v_{\max}, \quad (2)$$

где  $Q_{\max}$  — максимально возможная производительность очистного забоя, вычисляемая по методике ИГД СО РАН и программе “ПРОЗА 4.1” [13] с учетом скорости резания комбайном угольного пласта, пропускной способности скребкового конвейера и допускаемой концентрации метана на исходящей струе лавы, т/мин;  $\gamma$  — средневзвешенная плотность насыпной горной массы на конвейере, т/м<sup>3</sup>;  $S$  — площадь поперечного сечения насыпной горной массы, м<sup>2</sup>;  $k$  — коэффициент, учитывающий уменьшение площади сечения насыпной массы в зависимости от угла наклона конвейера;  $v_{\max}$  — максимально допустимая по (ФНиП) правилам безопасности скорость движения ленты, равная 3.15 м/с для грузолюдских конвейеров, 5.0 м/с для грузовых конвейеров [2–4, 14, 15].

Из (2) следует, что при одной и той же производительности очистного забоя и ширине ленты увеличение площади поперечного сечения насыпной массы позволяет снизить скорость движения ленты. Это в свою очередь снижает скорость ленты в пусковой период. При достижении максимально допустимой скорости движения ленты единственная возможность повысить пропускную способность конвейера заключается в увеличении площади поперечного сечения насыпной массы на ленте.

Контур поперечного сечения насыпной массы грузовой ветви ленточного конвейера на практике формируется трехроликовой опорой с одинаковой длиной  $l$  роликов. Площадь поперечного сечения насыпной массы зависит от длины  $l$  и угла  $\beta$  наклона боковых роликов к горизонтальной плоскости (рис. 1а).

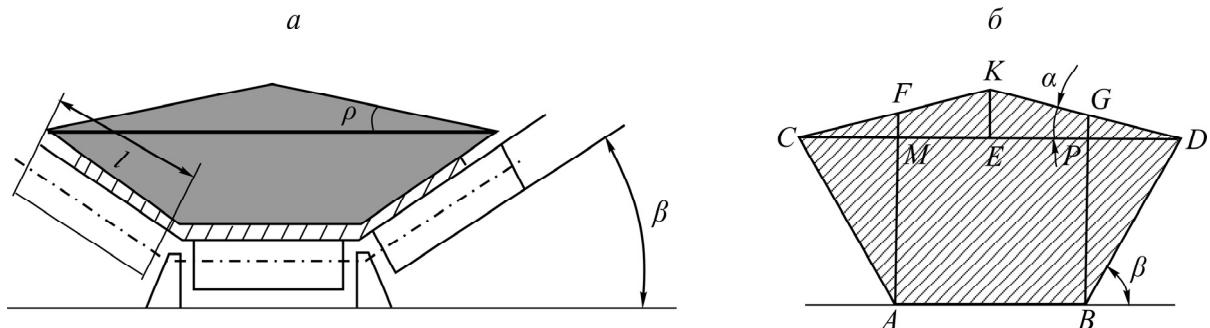


Рис. 1. Трехроликовая опора ленточного конвейера: *а* — поперечное сечение ленточного конвейера; *б* — геометрическая схема расчета площади поперечного сечения насыпной массы

Рассмотрим первоначально задачу максимизации площади поперечного сечения насыпной массы при нулевом угле естественного откоса ( $\alpha=0$ ).

#### АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ

Представим площадь трапеции в виде функции от длины  $l$  ролика и угла  $\beta$  наклона боковых роликов с учетом того, что длины нижнего основания и боковых сторон трапеции одинаковы и равны длине ролика.

Площадь трапеции  $ABDC$  определим как сумму площадей прямоугольника  $ABPM$  и двух прямоугольных треугольников  $ACM$  и  $BPD$  (рис. 1б):

$$S_1 = l^2 \sin \beta + l \sin \beta l \cos \beta = l^2 (\sin \beta + \sin \beta \cos \beta). \quad (3)$$

Максимизируем площадь трапеции в зависимости от угла наклона боковых роликов ленточного конвейера:

$$S_1(\beta) = l^2(\sin \beta + \sin \beta \cos \beta) \rightarrow \max. \quad (4)$$

Дифференцируем эту функцию и решаем уравнение:

$$\frac{\partial S_1(\beta)}{\partial \beta} = l^2(\cos \beta + \cos^2 \beta - \sin^2 \beta) = l^2(\cos \beta + 2 \cos^2 \beta - 1) = 0.$$

Обозначим:  $y = \cos \beta$ , получаем квадратное уравнение  $2y^2 + y - 1 = 0$ , решением которого в области положительных чисел является:

$$y_1 = \frac{-1 + \sqrt{1 + 8}}{4}; \quad y_o = \cos \beta = 0.5; \quad \beta = 60^\circ.$$

Таким образом, угол наклона боковых роликов, при котором площадь поперечного сечения насыпной массы в виде трапеции достигает максимума, составляет  $60^\circ$ . Следует заметить, что нормативные значения угла наклона боковых роликов равны  $25^\circ, 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ$  [2].

### ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ

Площадь насыпной массы представим в виде трапеции  $ABDC$  и треугольника  $CDK$  с углом естественного откоса  $\alpha$  (рис. 1б). Площадь треугольной массы выразим функцией от угла наклона боковых роликов и угла естественного откоса:

$$S_2(\beta) = 0.5(l + 2l \cos \beta)0.5(l + 2l \cos \beta) \operatorname{tg} \alpha = 0.25l^2(1 + 2 \cos \beta)^2 \operatorname{tg} \alpha.$$

Это нелинейная убывающая функция от угла наклона боковых роликов ленточного конвейера.

Площадь всего поперечного сечения насыпной горной массы на ленточном конвейере определяется в виде функции, имеющей максимум:

$$S = S_1 + S_2 = l^2(\sin \beta + \sin \beta \cos \beta) + 0.25l^2(1 + 2 \cos \beta)^2 \operatorname{tg} \alpha \rightarrow \max, \quad (5)$$

дифференцируя которую получаем уравнение

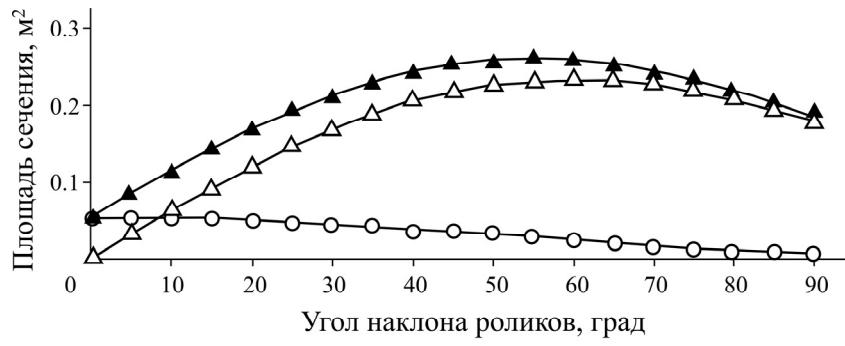
$$(2 \cos^2 \beta + \cos \beta - 1) + (-0.25 \sin \beta - \sin \beta \cos \beta) \operatorname{tg} \alpha = 0,$$

не имеющее аналитического решения.

Для численного решения задачи (5) для условий шахты “Инаглинская” Южно-Якутского угольного бассейна угледобывающей компании “Колмар” использованы следующие исходные данные:

- максимальная производительность очистного забоя 1415 т/ч (23.6 т/мин);
- длина ленточного конвейера 875 м;
- ширина ленты 1.2 м;
- стандартная длина роликов 0.425 м;
- лента резинотканевая, грузолюдская;
- угол естественного откоса насыпной массы  $15^\circ$  на ленте.

Для численного решения задачи максимизации площади сечения насыпной массы ленточного конвейера использована разработанная в ИГД СО РАН программа “ЛЕНТА-1.1”. Результаты решения приведены на рис. 2. Видно, что добавление насыпной массы в виде треугольника смещает максимум функции площади трапеции в сторону уменьшения угла наклона боковых роликов. Оптимальный угол наклона боковых роликов составляет  $55^\circ$ . Кроме того, на точку максимума функции суммарной площади сечения насыпной массы влияет угол естественного откоса, с увеличением которого оптимальный угол наклона боковых роликов уменьшается (таблица).



Площадь:  $\Delta$  трапеции;  $\circ$  треугольника;  $\blacktriangle$  суммарная насыпной массы

Рис. 2. Зависимость площади сечения насыпной массы от угла наклона боковых роликов конвейера

Результаты оптимизации площади сечения насыпной массы и скорости движения ленты конвейера

Параметр	Угол наклона боковых роликов, град								
	10	20	30	40	55	60	70	80	90
Площадь трапеции, м <sup>2</sup>	0.062	0.120	0.169	0.205	0.233	0.235	0.228	0.209	0.181
Площадь треугольника, м <sup>2</sup>	0.053	0.050	0.045	0.039	0.028	0.024	0.017	0.011	0.006
Суммарная площадь насыпной массы, м <sup>2</sup>	0.115	0.17	0.214	0.244	0.261	0.259	0.245	0.220	0.187
Скорость движения ленты, м/с	4.09	2.78	2.21	1.94	1.815	1.83	1.93	2.15	2.54
Ускорение движения ленты в пусковой период, м/с <sup>2</sup>	0.41	0.28	0.22	0.19	0.181	0.183	0.193	0.215	0.254

Результаты расчета площади поперечного сечения и скорости движения ленты в зависимости от угла наклона боковых роликов приведены в таблице и на рис. 3. При угле наклона боковых роликов  $55^\circ$  скорость движения ленты достигает минимума 1.8 м/с.

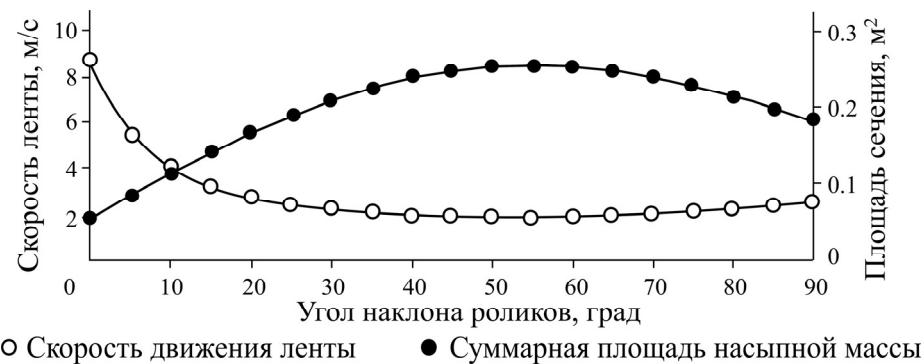


Рис. 3. Зависимости площади сечения насыпной массы и скорости движения ленты от угла наклона боковых роликов

По сравнению с максимальным нормативным значением угла наклона боковых роликов  $40^\circ$  площадь поперечного сечения насыпной массы при оптимальном угле наклона  $55^\circ$  увеличивается на 8.8 %, а скорость движения ленты уменьшается на 6.4 %. Это обеспечивает снижение мощности электродвигателя на 6.4 %. Влияние угла естественного откоса насыпной массы на оптимальный угол наклона боковых роликов конвейера представлено ниже:

Угол естественного откоса, град	15	20	25	30	35	40
Оптимальный угол наклона боковых роликов, град	55	53	51	49	47	45

Ускорение ленты в пусковой период, равный 10 с, так же, как и скорость ее движения, зависит от угла наклона боковых роликов и достигает минимума  $55^\circ$ . Угол естественного откоса насыпной массы влияет на решение задачи, его увеличение приводит к уменьшению оптимального угла наклона боковых роликов.

Таким образом, угол естественного откоса уменьшает оптимальный угол наклона боковых роликов, снижая его значение с  $60$  до  $45^\circ$  при соответствующем увеличении угла естественного откоса с  $0$  до  $45^\circ$ .

### СИЛА ТРЕНИЯ

Сила трения качения между лентой и роликами распределена неравномерно [1, 5]. Боковые ролики изнашиваются меньше, чем центральные. Это связано с изменением силы давления насыпной массы на боковые ролики в зависимости от угла их наклона. При изменении угла наклона боковых роликов одновременно изменяется площадь поперечного сечения и вес насыпной массы на ленточном конвейере.

При проектировании ленточных конвейеров сила трения на грузовой ветви рассчитывается укрупненно [1]:

$$F = \gamma S L k f \cos \delta,$$

где  $L$  — длина конвейера;  $f$  — коэффициент трения качения;  $\delta$  — угол наклона конвейера.

Суммарная сила трения в этом случае определяется по формуле

$$F = \gamma L f \cos \delta l^2 (\sin \beta + \sin \beta \cos \beta). \quad (6)$$

Рассмотрим более детально действие сил на ролики конвейера. Силы давления на ролики вызваны весом насыпной массы и при нулевом угле естественного откоса складываются из силы  $P_1$ , действующей в прямоугольном сечении на центральный ролик, и сил  $P_2$ , действующих в треугольных сечениях на боковые ролики (рис. 4).

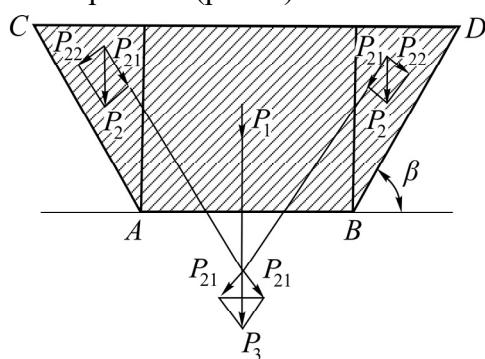


Рис. 4. Расчетная схема векторной суммы сил давления на ролики ленточного конвейера

Разложим силы  $P_2$  на составляющие  $P_{21}$  и  $P_{22}$ , действующие соответственно параллельно и перпендикулярно боковым роликам. Силы  $P_{21}$  перенесем по линиям их действия и сложим векторно, как показано на рис. 4. Равнодействующая  $P_3$  этих сил добавляется к силе  $P_1$ , и центральный ролик действует как сумма этих сил. Модули всех сил определяются по формулам:

$$\begin{aligned}
 P_1 &= \gamma l^2 L \cos \delta; \\
 P_2 &= 0.5 \gamma L \cos \delta \cdot l^2 s \sin \beta \cos \beta; \\
 P_{21} &= P_2 \cos \beta = 0.5 \gamma L \cos \delta \cdot l^2 s \sin \beta \cos^3 \beta; \\
 P_{22} &= P_2 \sin \beta = 0.5 \gamma L \cos \delta \cdot l^2 s \sin^2 \beta \cos \beta; \\
 P_3 &= 2P_{21} \sin \beta = \gamma L \cos \delta \cdot l^2 s \sin^2 \beta \cos^3 \beta.
 \end{aligned}$$

Суммарная сила трения грузовой ветви ленточного конвейера равна по модулю

$$F = \gamma L f \cos \delta (P_1 + P_3 + 2P_{22}) = \gamma L f \cos \delta l^2 (1 + s \sin^2 \beta \cos^3 \beta + \sin \beta \cos^3 \beta).$$

С учетом угла естественного откоса на ленте суммарная сила трения:

$$F = \gamma L f \cos \delta (l^2 (1 + s \sin^2 \beta \cos^3 \beta + \sin \beta \cos^3 \beta) + 0.125 l^2 (1 + 2 \cos \beta)^2 \operatorname{tg} \alpha). \quad (7)$$

Сравнивая эту формулу с (6), замечаем, что суммарная сила трения с учетом действия бокового давления увеличивается. Так, для горизонтального ленточного конвейера длиной 875 м (рис. 5) и углом наклона боковых роликов  $60^\circ$  суммарная сила трения для прямолинейного участка 7–8, определенная по (6), составляет 79.7 кН, а по (7) — 86.4 кН. Увеличение силы трения равно 8.4 % [15].

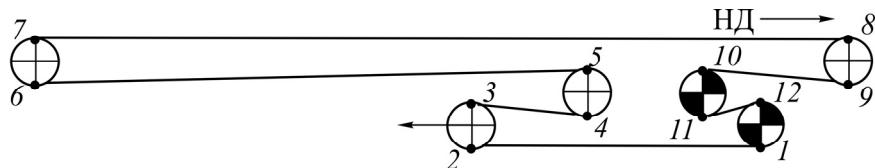
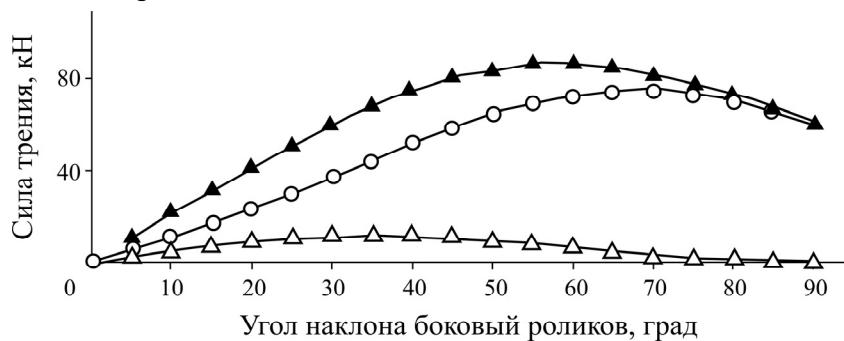


Рис. 5. Схема многоприводного горизонтального ленточного конвейера (НД — направление движения ленты)

На рис. 6 показано, как изменяется сила трения на ролики в зависимости от угла наклона боковых роликов. Максимальная сила трения (11.8 кН) на боковые ролики возникает при угле наклона  $35^\circ$ , максимальная сила трения (75.1 кН) на центральный ролик — при угле наклона боковых роликов  $70^\circ$ . Суммарная сила трения грузовой ветки ленты (86.4 кН) максимальна при угле наклона боковых роликов  $60^\circ$ .



Сила трения:  $\Delta$  на боковой ролик;  $\circ$  на центральный ролик;  $\blacktriangle$  суммарная

Рис. 6. Зависимость сил трения ленты от угла наклона боковых роликов

## ВЫВОДЫ

Оптимальный угол наклона боковых роликов ленточного конвейера при трапециевидной форме насыпной массы не зависит от длины роликов и ширины ленты и составляет  $60^\circ$ . При этом значении угла площадь поперечного сечения насыпной массы достигает максимума,

а скорость движения ленты минимальна. При угле естественного откоса  $15^\circ$  оптимальный угол наклона боковых роликов составляет  $55^\circ$ . При дальнейшем повышении угла естественного откоса до  $40^\circ$  оптимальный угол наклона боковых роликов конвейера снижается до  $45^\circ$ . Увеличение угла наклона боковых роликов конвейера с максимального нормативного значения 40 до  $60^\circ$  при ширине ленты 1.2 м позволяет повысить площадь поперечного сечения насыпной массы на 8.8 % и снизить скорость движения ленты на 6.4 %. В подземных горных выработках небольшого сечения старых шахт и рудников данное решение дает возможность установить став ленточного конвейера без расширения выработки.

При проектировании ленточного конвейера необходимо учитывать силы бокового давления насыпной массы на центральные ролики, которые увеличивают силу трения грузовой ветви ленты. Использование общепринятой формулы для расчета силы трения грузовой ветки ленты приводит к уменьшению силы трения по сравнению с фактической и к неправильному расчету силы тяги и мощности электродвигателей привода конвейера.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зенков Р. Л., Петров М. М. Конвейеры большой мощности. — М.: Машиностроение, 1964. — 426 с.
2. ОСТ 12.14.130-79. Конвейеры ленточные шахтные. Методика расчета. — М.: МУП СССР, 1980. — 70 с.
3. ГОСТ 20-85. Ленты конвейерные резинотканевые. Технические условия. — М.: Госстандарт, 1985.
4. Госстандарт РФ № 476-ст. Конвейеры шахтные ленточные. — М.: Госстандарт, 2002. — 27 с.
5. Шахмейстер Л. Г., Солод Г. И. Подземные конвейерные установки. — М.: Недра, 1976. — 432 с.
6. Шахмейстер Л. Г., Дмитриев В. Г. Расчет ленточных конвейеров для шахт и карьеров. — М.: МГИ, 1972. — 298 с.
7. Пертен Ю. А. Конвейеры, справочник. — М.: Машиностроение, 1984. — 155 с.
8. Солод В. И., Гетопанов В. Н., Рачек В. М. Проектирование и конструирование горных машин и комплексов. — М.: Недра, 1982. — 350 с.
9. Конвейеры ленточные. Проектирование и расчеты. НВ-542-90. — Новосибирск: ООО “Сибгипрошахт”, 1990.
10. Пертен Ю. А. Конвейерные системы. — СПб.: Профессионал, 2008. — 230 с.
11. Рудничный транспорт и механизация вспомогательных работ / Ю. А. Кондрашин, В. К. Колояров, С. И. Ястремский, Г. Г. Меграбян, Н. Н. Саитов. — М.: Горн. кн., 2010. — 534 с.
12. Руководство эксплуатации конвейерных лент. — Курск: Резинотехника, 2007. — 93 с.
13. Ордин А. А., Тимошенко А. М., Ботвенко Д. В., Никольский А. М. Обоснование оптимальной длины и производительности очистного забоя при отработке мощного угольного пласта шахты “Талдинская-Западная-1” // Уголь. — 2019. — № 3. — С. 50–54.
14. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности “Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых”. Утв. 08.12.2020 г. Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору № 505, зарегистрированы Минюстом России 21.12.2020 г., регистр. № 61651.
15. Ордин А. А., Никольский А. М. Подугольников Е. В. Обоснование рациональных технических параметров многоприводных высокопроизводительных ленточных конвейеров // ФТПРПИ. — 2023. — № 2. — С. 91–102.

Поступила в редакцию 14/XII 2023

После доработки 09/II 2024

Принята к публикации 24/I 2024