

УДК 681.532.2:621.867.2

UDC 681.532.2:621.867.2

**МЕТОД УЛУЧШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И АКУСТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЛЕНТОЧНЫХ КОНВЕЙЕРОВ НА ВОЗДУШНОЙ ПОДУШКЕ****THE METHOD OF THE IMPROVEMENT OF POWER AND ACOUSTIC PARAMETERS OF TAPE CONVEYORS ON A HOVERCRAFT**

Мурзинов Валерий Леонидович  
д.т.н., доцент

Murzinov Valery Leonidovich  
Dr.Sci.Tech., associate professor

Мурзинов Павел Валерьевич  
к.т.н.  
*Воронежская государственная лесотехническая академия, Воронеж, Россия*

Murzinov Pavel Valerejvich  
Cand.Tech.Sci.  
*Voronezh State Academy of Forestry and Technologies, Voronezh, Russia*

Рассмотрен метод управления величиной проходного сечения питающих сопел в ленточных конвейерах на воздушной подушке. Показана локальная система, реализующая принцип регулятора прямого действия, для управления толщиной воздушной подушки. На основе гидродинамической модели определены формулы для инженерных расчетов значений характеристик устройств перемещения

The method of control of the amount of flow area of the supply nozzles in tape conveyor on a hovercraft is considered in the article. The local system that implements the principle of direct action to control the thickness of the air cushion is shown. Based on the hydrodynamic model, the formula for the engineering calculations of values of the moving devices are determined

Ключевые слова: ЛЕНТОЧНЫЙ КОНВЕЙЕР, ВОЗДУШНАЯ ПОДУШКА, УПРАВЛЕНИЕ

Keywords: TAPE CONVEYOR, HOVERCRAFT, CONTROL

Перспективными конвейерами высокой производительности и большой протяженности при небольшом удельном расходе энергии и металла, и использовании лент нормальной прочности являются конвейеры на воздушной подушке. Они входят в номенклатуру оборудования современных производств, как средство транспортирования различных грузов: от штучных изделий до сыпучих материалов. По сравнению с традиционными ленточными конвейерами на роликотопорах они обладают рядом преимуществ.

1. Стабильная работа, безопасность и надежность.
2. Длительный срок службы, низкие эксплуатационные расходы.
3. Удобство установки, высокая производительность.
4. Низкая металлоёмкость.
5. Небольшие затраты на обслуживание и ремонт.

Однако имеются и недостатки – отсутствие систем управления толщиной воздушной подушки. У этих конвейеров величина толщины

воздушной подушки определяет энергетические показатели, уровень шума, устойчивость процесса перемещения и т.д. Поэтому управление размерами воздушной подушки может обеспечить наиболее эффективный режим функционирования всей транспортной системы.

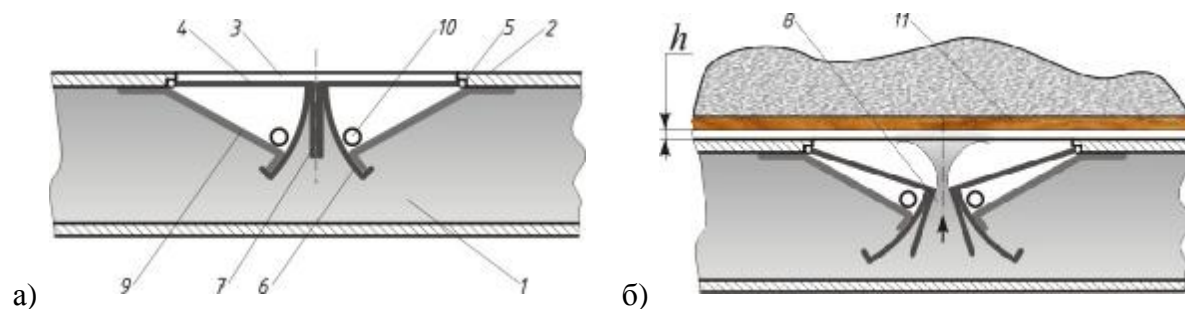


Рис.1. Схема фрагмента конвейера с соплом переменного сечения. а) Режим отсутствия транспортёрной ленты: сопло закрыто. б) Режим транспортирования на воздушной подушке: сопло открыто на величину соответствующую нагрузке на транспортёрную ленту.

В Воронежской лесотехнической академии разработан пневмоконвейер со стабилизированной толщиной воздушной подушки [1]. Конвейер с воздушной подушкой, показанный на рис.1, включает пневмокамеру 1, и расположенную над ней несущую поверхность 2, в которой выполнены прямоугольные отверстия 3. В этих отверстиях установлены подвижные пластины 4. К пластинам 4, способным поворачиваться относительно осей 5, жестко прикреплены ограничительные пластины 6 и стенки 7, которые являются стенками конического щелевого отверстия 8. На нижней стороне несущей поверхности 2 установлены неподвижные ограничительные стенки 9. В боковой стенке полости, образованной неподвижной ограничительной стенкой 9, подвижной пластиной 4, ограничительной пластиной 6 и стенками пневмокамеры 1, выполнено атмосферное отверстие 10, соединяющее эту полость с атмосферой. Над несущей поверхностью 2 располагается транспортёрная лента 11 на воздушной подушке.

Для успешного проектирования конвейеров, обеспечивающих управление толщиной воздушной подушки в условиях не постоянства

нагрузки на транспортёрную ленту, необходимы инженерные методы расчёта конструктивных элементов и аэродинамических характеристик транспортной системы. Эти методы могут быть получены на основе моделирования процесса создания воздушной подушки. Для этого необходимо определить распределение давления под транспортёрной лентой на основании учёта сил, действующих на транспортируемое изделие и определить толщину воздушной подушки в равновесном состоянии в зависимости от различных конструктивных и расходных характеристик. Для определения толщины воздушной подушки под транспортируемым изделием рассмотрим расчётную схему на рис.2.

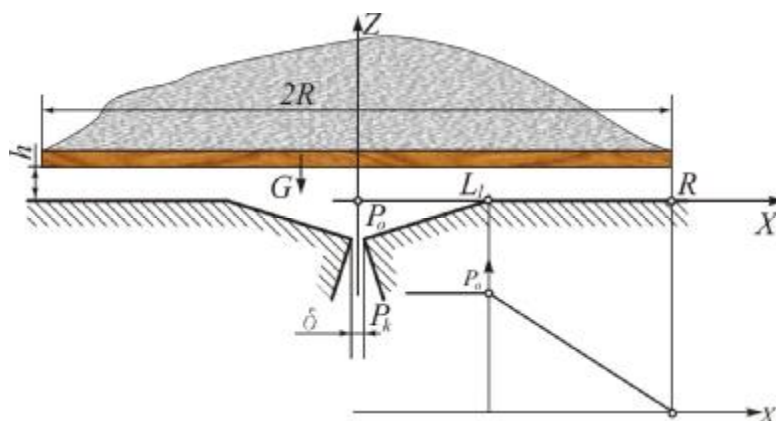


Рис.2. Расчётная схема для определения толщины воздушной подушки при наличии кармана с коническим соплом.

На расчетной схеме (рис.2) представлены основные размеры системы, коническое сопло и транспортёрная лента с грузом. Используя методику решения таких задач для течения воздуха в плоском канале запишем систему уравнений Навье-Стокса с учётом ряда допущений применяемых для плоских течений [2]. Тогда, применительно к участку

$$[L_1; R] \text{ можно записать } \left. \begin{array}{l} \frac{\partial P}{\partial x} = m \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \\ \frac{\partial(rU)}{\partial x} = 0 \end{array} \right\}, \quad (1)$$

где  $P$  – избыточное давление в воздушной прослойке, Па;  $U$  – скорость

воздушной среды вдоль оси координат  $X$ , м/с;  $\rho$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $m$  – динамическая вязкость воздуха, (Н·с)/м<sup>2</sup>.

В результате решения системы уравнений (1) с учётом граничных условий

$$\left. \begin{aligned} U = 0 \quad \text{при} \quad z = 0 \\ U = 0 \quad \text{при} \quad z = h \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

получим уравнение для скорости потока в воздушной подушке

$$U = \frac{1}{2m} \frac{dP}{dx} (h - z)z. \quad (3)$$

Принимая во внимание уравнение неразрывности в интегральной форме для сечения в потоке при условии отсутствия источников в самом потоке, то можно записать

$$\int_0^h \frac{\partial U}{\partial x} dz = 0. \quad (4)$$

и учитывая граничные условия

$$\left. \begin{aligned} P = P_o \quad \text{при} \quad x = L_1 \\ P = 0 \quad \text{при} \quad x = R \end{aligned} \right\}, \quad (5)$$

получим распределение давления в воздушной подушке на интервале значений  $[L_1; R]$

$$P = P_o \frac{(R - x)}{(R - L_1)}. \quad (6)$$

Величину  $P_o$  давления в кармане определим из условия равновесия транспортёрной ленты на воздушной подушке. Вес  $G$  транспортёрной ленты с грузом на участке шириной  $B$  уравнивается избыточным давлением в воздушной подушке и для этого равновесия можно записать

$$G = 2L_1BP_o + 2B \int_{L_1}^R P dx, \text{ откуда } P_o = \frac{G}{B(R + L_1)} \quad (7)$$

и скорость потока в воздушной подушке будет

$$U = \frac{G}{2mB(R^2 - L_1^2)} (h - z)z. \quad (8)$$

Расход воздуха  $Q_{\Pi}$  необходимый для создания воздушной подушки может быть определен из равенства

$$Q_{\Pi} = 2B \int_0^h U dz \text{ или } Q_{\Pi} = \frac{G}{6m(R^2 - L_1^2)} h^3 \quad (9)$$

В уравнении (9) не определена  $h$  толщина воздушной подушки. Эту толщину можно найти из условия равенства расходов воздуха  $Q_{\Pi}$  в потоке воздушной подушки и  $Q_c$  расхода воздуха через коническое сопло.

Для определения зависимости расхода воздуха через коническое сопло от его ширины, рассмотрим расчетную схему на рис.3. Условие равновесия на подвижной пластине, с учетом обозначений, показанных на рис.3, будет

$$M_1 = M_2, \quad (10)$$

где  $M_1 = \int_0^H B(P_k - P_z) \left[ (H - z) + L_o \sin \frac{\alpha}{2} \right] dz$ ,  $M_2 = BP_o L_o^2$ .

В уравнение (10) входит величина распределения давления в плоском коническом канале  $P_z$ . Поэтому возникает задача определения этого давления.

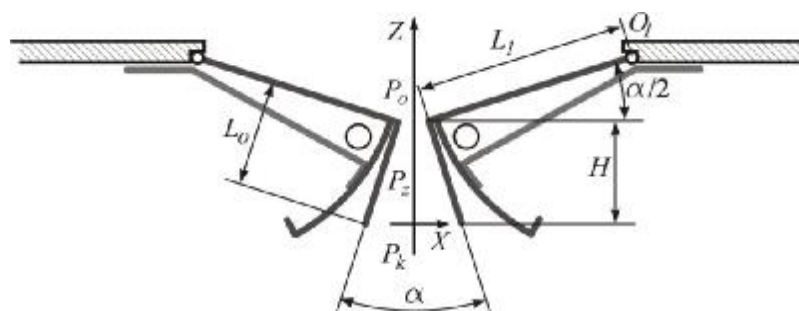


Рис.3. Расчетная схема для определения величины проходного сечения конического сопла.

На расчетной схеме на рис.3 для определения  $P_z$  представлены основные размеры плоского конического сопла. Для течения воздуха под изделием запишем систему уравнений Навье-Стокса с учетом ряда допущений применяемых, для плоских течений [3, 4]

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial z} = m \frac{\partial^2 W}{\partial x^2}, \quad \frac{\partial P}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \end{aligned} \right\}, \quad (11)$$

где  $P$  – избыточное давление в воздушной прослойке, Па;  $W$ – скорость воздушной среды вдоль соответствующих осей координат  $z$ , м/с;  $m$  – динамическая вязкость воздуха,  $(H \cdot c)/m^2$ .

Для системы уравнений (11) граничные условия имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} W = 0 \quad \text{при} \quad x = r \\ W = 0 \quad \text{при} \quad x = -r \end{aligned} \right\}, \quad (12)$$

где  $r = (H - z) \operatorname{tg}\left(\frac{a}{2}\right) + \frac{d}{2}$ ,  $H = L_o \cos \frac{a}{2}$ ,  $d = L_1 \left(1 - \cos \frac{a}{2}\right)$ .

Проинтегрируем дважды по  $x$  первое и второе уравнения системы (11), учитывая граничные условия (12) получим значение скорости вдоль конического канала

$$W = -\frac{1}{2 \cdot m} (r^2 - x^2) \frac{\partial P}{\partial z}. \quad (13)$$

Расход через любое сечение конического канала будет постоянным и определится на основе скорости (13)

$$Q_c = \int_{-r}^r W dx = -\int_{-r}^r \frac{1}{2 \cdot m} (r^2 - x^2) \frac{\partial P}{\partial z} dx = \int_0^r \frac{1}{m} (r^2 - x^2) \left(-\frac{\partial P}{\partial z}\right) dx. \quad (14)$$

Из уравнения (14) с учётом (13) после интегрирования получим

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \frac{3}{2m \cdot r^3} Q_c. \quad (15)$$

Сделаем замену переменных в (15) и определим  $z = L_1 - \frac{r - \frac{d}{2}}{\operatorname{tg}\left(\frac{a}{2}\right)}$  и

$dz = -\frac{1}{\operatorname{tg}\left(\frac{a}{2}\right)} dr$ . Учитывая эту замену и принимая во внимание следующие

граничные условия

$$\left. \begin{aligned} P = P_k \quad \text{и} \quad r = H \operatorname{tg} \frac{a}{2} + \frac{d}{2} \quad \text{при} \quad z = 0 \\ P = P_o \quad \text{и} \quad r = \frac{d}{2} \quad \text{при} \quad z = H \end{aligned} \right\}, \quad (16)$$

запишем (16) распределение давления вдоль оси конического канала в виде

$$P_z = A - \frac{m}{3B} \frac{Q_c}{\left[ (H - z) \operatorname{tg} \frac{a}{2} + \frac{d}{2} \right]^2}, \quad (17)$$

где 
$$Q_c = \frac{3}{16m} B d^2 (P_k - P_o) \left[ 4 \operatorname{tg} \frac{a}{2} + \frac{d^2}{H \left( H \operatorname{tg} \frac{a}{2} + d \right)} \right], \quad A = P_k + \frac{(P_k - P_o) d^2}{4H \operatorname{tg} \frac{a}{2} \left( H \operatorname{tg} \frac{a}{2} + d \right)},$$

$$d = L_1 \left( 1 - \cos \frac{a}{2} \right).$$

По уравнению (17) построена характерная зависимость изменения давления вдоль плоского конического канала, что показано на рис.4.

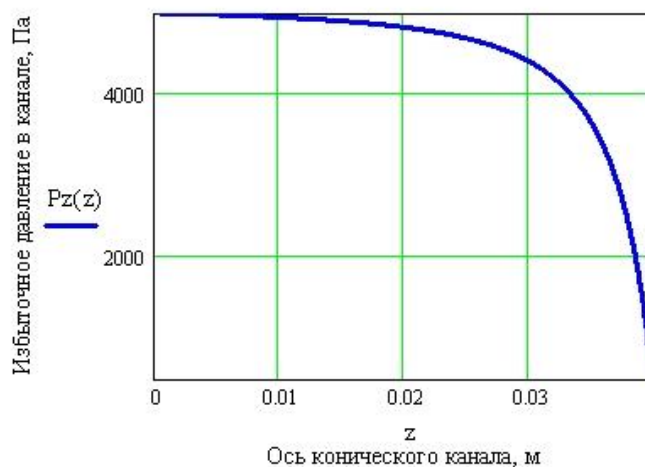


Рис.4. График изменения избыточного давления вдоль оси плоского конического канала при следующих значениях  $\alpha=0.2$ ;  $P_k=5000$  Па;  $P_o=470$  Па;  $\mu=0.185 \cdot 10^{-4} (H \cdot c)/m^2$ .

Подставляя в условие равновесия (10) давление  $P_z$  из (17), и выполняя интегрирование, получим соотношение, из которого можно извлечь  $\alpha$ , определяющего величину проходного сечения конического сопла. Из равенства расходов  $Q_{II} = Q_c$  определим толщину воздушной

подушки

$$h = \left[ \frac{9 B d^2 (R^2 - L_1^2)}{8 G} (P_k - P_o) \left[ 4 \operatorname{tg} \frac{a}{2} + \frac{d^2}{H \left( H \operatorname{tg} \frac{a}{2} + d \right)} \right] \right]^{\frac{1}{3}}, \quad (18)$$

где  $d = L_1 \left( 1 - \cos \frac{a}{2} \right)$ .

Из уравнения (10) в силу его громоздкости сложно получить величину  $\alpha$  в виде аналитической зависимости. Поэтому решение уравнения (10) относительно  $\alpha$  можно осуществить графическим методом.

На рис.5 ÷ рис.10 показаны графики функций  $M_1(a)$ ,  $M_2(a)$  и  $h(a,G)$ . Точка пересечения кривых  $M_1(a)$  и  $M_2(a)$  позволяет найти на кривой  $h(a,G)$  точку А, координаты которой содержат информацию о величине толщины воздушной подушки. Для различных нагрузок были выполнены графические построения для определения толщины воздушной подушки. Результаты сведены в таблицу.

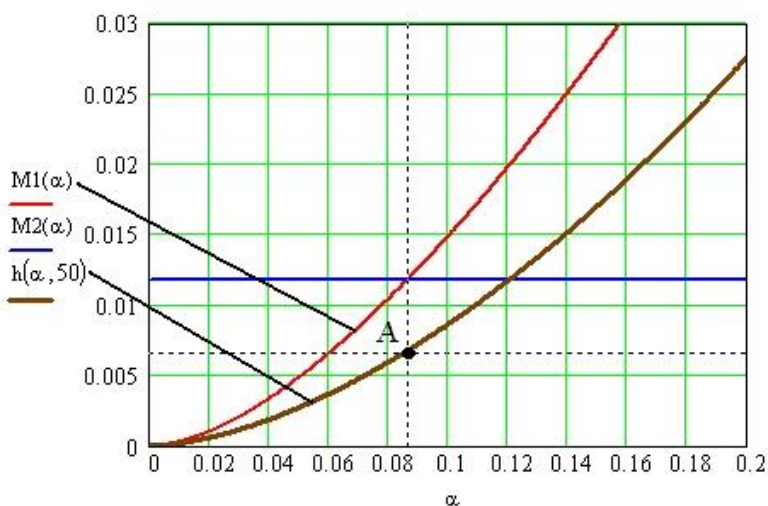


Рис.5. Графическое определение значения толщины воздушной подушки при следующих параметрах  $P_k=5000$  Па;  $P_o=59$  Па;  $\mu=0.185 \cdot 10^{-4}$  (Н·с)/м<sup>2</sup>. Точка А с координатами ( $\alpha=0.087$ ;  $h=0.007$ )



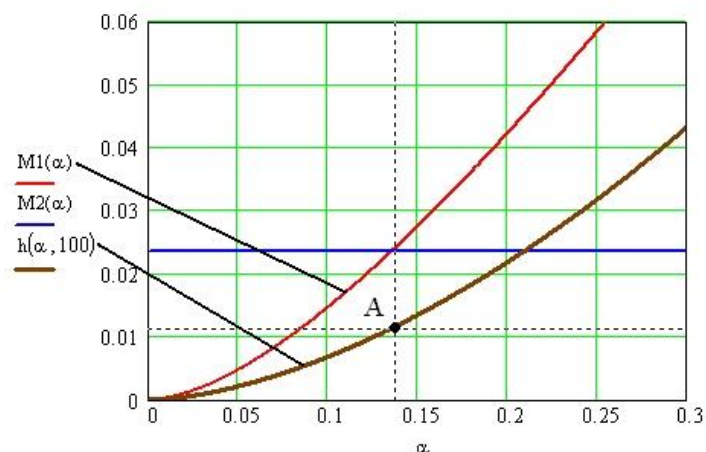


Рис.6. Графическое определение значения толщины воздушной подушки при следующих параметрах  $P_k=5000$  Па;  $P_o=117$  Па;  $\mu=0.185 \cdot 10^{-4}$  (H·с)/м<sup>2</sup>. Точка А с координатами ( $\alpha=0.138$ ;  $h=0.012$ ).

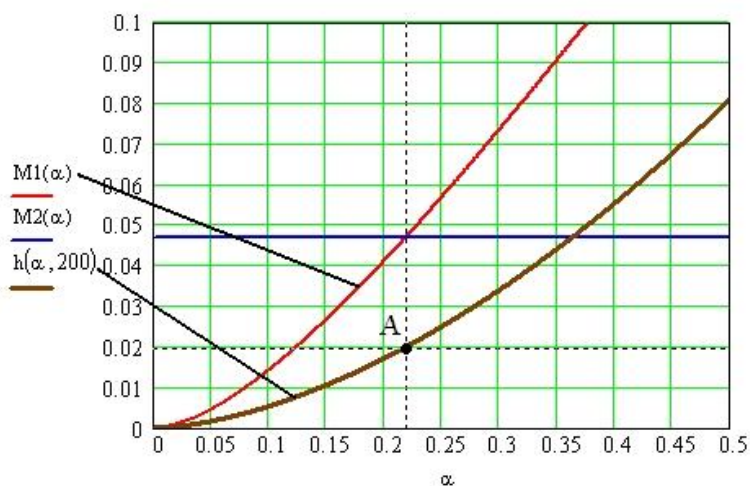


Рис.7. Графическое определение значения толщины воздушной подушки при следующих параметрах  $P_k=5000$  Па;  $P_o=235$  Па;  $\mu=0.185 \cdot 10^{-4}$  (H·с)/м<sup>2</sup>. Точка А с координатами ( $\alpha=0.220$ ;  $h=0.02$ ).

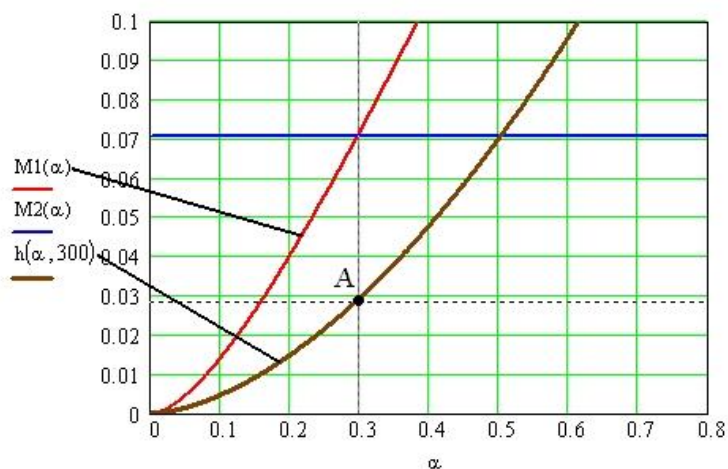


Рис.8. Графическое определение значения толщины воздушной подушки при следующих параметрах  $P_k=5000$  Па;  $P_o=352$  Па;  $\mu=0.185 \cdot 10^{-4}$  (H·с)/м<sup>2</sup>. Точка А с координатами ( $\alpha=0.229$ ;  $h=0.029$ ).

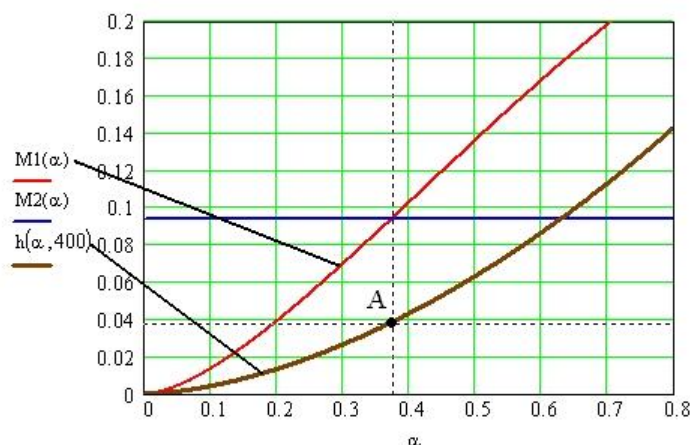


Рис.9. Графическое определение значения толщины воздушной подушки при следующих параметрах  $P_k=5000$  Па;  $P_o=470$  Па;  $\mu=0.185 \cdot 10^{-4}$  (Н·с)/м<sup>2</sup>. Точка А с координатами ( $\alpha=0.378$ ;  $h=0.039$ ).

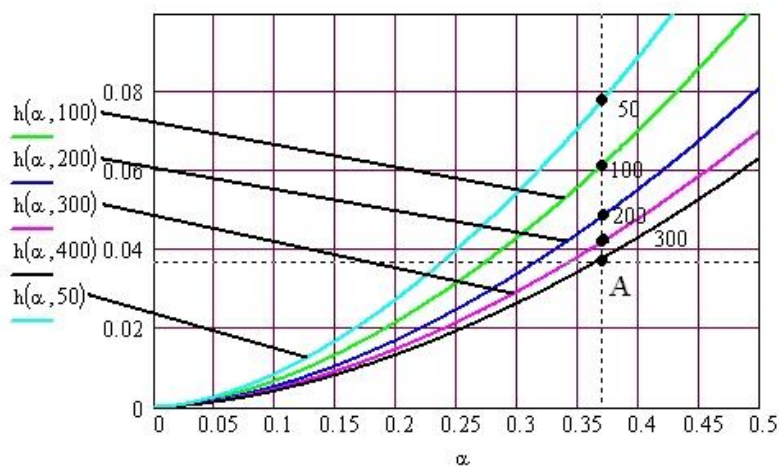


Рис.10. Графическое определение значения толщины воздушной подушки при следующих параметрах  $P_k=5000$  Па. Точки А, 300, 200, 100, 50 с координатой ( $\alpha=0.378$ ).

Таблица

Характеристики воздушной подушки при различных нагрузках.

Условное обозначение точки	Нагрузка на квадратный метр транспортёрной ленты, Н	Постоянное сечение сопла		Переменное сечение сопла	
		$\alpha$	h, м	$\alpha$	h, м
50	42	0.378	0.078	0.087	0.007
100	83	0.378	0.062	0.138	0.012
200	167	0.378	0.049	0.220	0.020
300	250	0.378	0.042	0.299	0.029
А	333	0.378	0.039	0.378	0.039

По табличным данным построены графики зависимости толщины воздушной подушки от величины нагрузки на транспортёрную ленту.

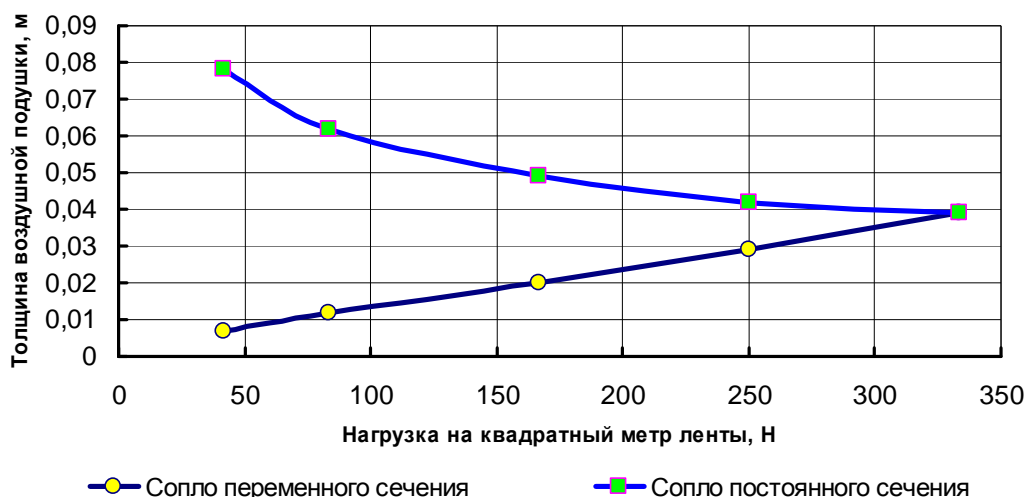


Рис.11. Зависимость толщины воздушной подушки от величины удельной нагрузки на транспортёрную ленту при  $P_k=5000$  Па.

Кривые зависимостей, представленные на рис.11, показывают, что толщина воздушной подушки при использовании сопел переменного сечения уменьшается, когда нагрузка на транспортёрную ленту снижается. В случае использования сопел постоянного сечения, толщина воздушной подушки увеличивается с уменьшением нагрузки на транспортёрную ленту, что приводит к значительным энергетическим потерям и повышенному аэродинамическому шуму. Из этого следует, что применение рассмотренного метода управления толщиной воздушной подушки в конструкции ленточного конвейера решает задачу снижения энергетических затрат и уровня шума.

## Литература

1. Патент 2342305 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> В 65 G 51/00. Пневмоконвейер со стабилизированной толщиной воздушной подушки [Текст] / Мурзинов В.Л., Мурзинов П.В., Мурзинов Ю.В. – Оpubл. 27.12.2008 Бюл. №36.
2. Емцев Б.Т. Техническая гидромеханика. – М.: Машиностроение, 1978. – 463 с.
3. Мурзинов В.Л. Автоматическая стабилизация толщины воздушной подушки и снижение шумоизлучения в пневмоконвейерах [Текст] // Автоматизация и современные технологии. – 2008, №10. – С. 3–7.
4. Мурзинов В.Л. Малошумный пневмоконвейер с дозированной подачей сжатого воздуха в воздушную подушку [Текст] // Известия вузов. Машиностроение. – 2007, №10. – С. 44–50.