

К ВОПРОСУ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЫТЕСНЕНИЯ ВОЗДУХА ИЗ ОБЪЕМНОЙ ВОЛОКНИСТОЙ ЛЕНТЫ ПРИ ЕЕ СЖАТИИ

SEVERAL STUDIES ON MODELING THE PROCESS OF AIR DISPLACEMENT FROM A BULKY SLIVER SUBJECTED TO COMPRESSION

*В.С. НИКОЛАЕВ, В.В. ВОЛКОВ, А.М. БОЧКОВ, В.В. БУРКОВ
V.S. NIKOLAYEV, V.V. VOLKOV, A.M. BOCHKOV, V.V. BURKOV*

(Пензенская государственная технологическая академия)
(Penza State Technological Academy)
E-mail: mycolo@rambler.ru

Представлена модель истечения воздуха из объемной волокнистой ленты с учетом факторов ее движения и сжатия, описываемых функцией состояния – развеса ленты (линейной плотности), где каждый ее участок описывается функцией пористой структуры.

The model of the flow of air from the bulk of the fiber flax-you with regard to the factors of its motion and compression, described by the function of the state of - hang tape (linear density), where each of its plot is described by the porous structure.

Ключевые слова: волокнистая лента, развес ленты (линейная плотность), технологический элемент, модель вытеснения воздуха, избыточное давление, условия ограничений, функция цели.

Keywords: sliver, by weight tape (linear density), the technological element, model displacement air, overpressure, conditions constraints, the objective function.

В системах автоматического контроля и регулирования линейной плотности ленты в качестве промежуточного преобразователя измерительного устройства используется технологический элемент уплотнения волокнистой ленты [1], [2]. Факторы влияния в модели передаточной функции уплотнителя выражены неравномерностью распределения числа волокон в сечении волокнистой ленты и коэффициентом трения, зависящим от скорости движения ленты. Усилия протаскивания ленты в уплотнительной воронке характеризуют величину передаточной функции, существенны и определяют ее интегрирующие свойства. Значительные скоростные режимы ленточной машины, вызванные повышением производительности, в комплексе с процессом сжатия объемной волокни-

стой ленты ведут к выдавливанию из нее воздушной массы, что вызывает пушение ленты и сказывается на фактической точности передаточной функции.

Исследование процесса истечения воздуха из объемной волокнистой ленты при сжатии принимает допущения по ее пористости, которые включают следующее – лента состоит из параллелизованных волокон; – пространство между волокнами заполнено воздушной средой; – волокна анизотропны и обладают свойствами упругой податливости; – вытеснение или течение воздуха из ленты является фильтрационным процессом.

Полученные допущения определяют математическую модель процесса, суть которой – исследование связи линейной плотности ленты с пневматическим напо-

ром при ее сжатии [2]. Описание фильтрационных течений [3] использует закон Дарси [4], связи между скоростью воздуха и градиентом давления в физической точке. Само моделирование предусматривает назначение параметров физико-механических процессов с присущими условиями их ограничений, это: – скорость движения воздуха; – пористость ленты; – проницаемость волокнистой ленты; – объем вытесненного воздуха; – расход воздуха; – представление элементов фильтрации в виде дросселей; – описание целевой функции вытеснения воздуха.

Условие движения воздуха. Скорость частицы воздуха, проходящего через физическую точку в порах между волокнами, непостоянна и зависит от средней скорости воздуха, частной производной давления в точке и компоненты плотности воздуха [2]. Тензорная запись скорости фильтрации в точке при проекции ее на оси x, y, z имеет вид:

$$v_x = -\frac{K \partial P}{g \rho \partial x}; \quad v_y = -\frac{K \partial P}{g \rho \partial y}; \quad v_z = -\frac{K \partial P}{g \rho \partial z}, \quad (1)$$

или в векторной форме:

$$\vec{v} = -\frac{K}{g \rho} \text{grad} P, \quad \text{или} \quad \vec{v} = -\frac{K_{\Pi}}{\mu} \text{grad} P, \quad (2)$$

где ρ – плотность воздуха; P – давление; g – ускорение свободного падения; K – коэффициент фильтрации волокнистой ленты; μ – динамическая вязкость воздуха; K_{Π} – коэффициент проницаемости ленты, выраженный в м^2 .

Условие пористости волокнистой ленты. Пористость связывает среднюю физическую скорость воздуха V_{Φ} по объему пор и скорость фильтрации \bar{V} по объему физической точки через соотношение $v = \varepsilon V_{\Phi}$. Также от пористости среды зависит коэффициент фильтрации, выраженный функцией $K = K(\varepsilon)$. Аналитическая связь между коэффициентом фильтрации и пористостью для простейших моделей рассмотрена в работах [3], [4] и др.

Выражение пористости через функцию $\varepsilon = \varepsilon(x, y, z)$, описываемую координатой физической точки X, Y, Z , подразумевает ее переменной. Физический смысл пористости волокнистой ленты в канале уплотнителя в соответствии с [2] имеет вид:

$$\varepsilon = 1 - \frac{4 m_{\text{в.к}}}{Y_{\text{лк}} \pi D_{\text{вых}}^2 \gamma_m}, \quad (3)$$

где $m_{\text{в.к}}$ – масса волокон в канале; γ_m – объемная масса волокон; $Y_{\text{лк}}$ – длина калиброванного канала уплотнителя; $D_{\text{вых}}$ – диаметр канала уплотнителя (рис. 1 – схема прохождения волокнистой ленты через внутренний профиль уплотнителя при одностороннем истечении воздуха).

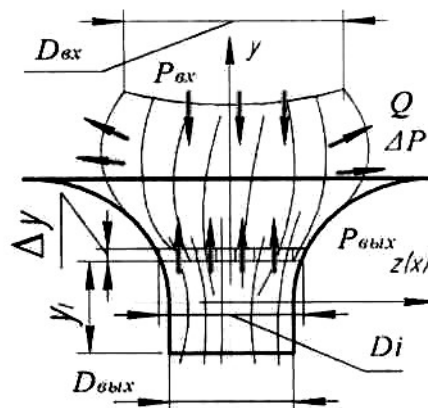


Рис. 1

Пористость волокнистой ленты можно выразить соотношением объема пустот (пор) к объему ленты. Для длины Δy канала уплотнителя диаметром $D_{\text{вых}}$ и в нем находящихся n волокон со средним диаметром $d_{\text{в}}$:

$$\varepsilon = 1 - \frac{n d_{\text{в}}^2}{D_{\text{вых}}^2}. \quad (4)$$

Условие проницаемости волокнистой ленты. Из условия размерности коэффициента проницаемости (2) его функцию можно представить зависимостью $K_{\Pi} = K_{\Pi}(S_0, \varepsilon)$, где S_0 – удельная поверх-

ность материала, m^{-1} , выражена отношением $S_0 = 4/d_B$.

Приняв обратное значение S_0 через гидравлический радиус $1/S_0$ и выделив са-

$$K_{\Pi} = \frac{1}{S_0^2} f(\varepsilon) = \frac{1}{S_0^2} \left(1 - \frac{nd_B^2}{D_{\text{ВЫХ}}^2} \right) = \frac{d_B^2}{16D_{\text{ВЫХ}}^2} (D_{\text{ВЫХ}}^2 - nd_B^2). \quad (5)$$

При допущениях по Козени и Кармана о неопределенности форм пор, которые являются сообщающимися с эффективным поровым пространством, модель волокнистой ленты будет носить приближенный характер.

Условие вытеснения объема воздуха. Находящаяся в уплотнителе волокнистая лента (рис. 1), имеет геометрические характеристики объема на входе:

$$\Delta V_{\text{ВХ}} = \frac{\pi D_{\text{ВХ}}^2}{4} \Delta \ell \text{ и на выходе: } \Delta V_{\text{ВЫХ}} = \frac{\pi D_{\text{ВЫХ}}^2}{4} \Delta \ell,$$

где $D_{\text{ВХ}}$, $D_{\text{ВЫХ}}$, Δy – соответственно диаметры ленты на входе и в канале уплотнителя, элементарная длина исследуемой ленты. Изменение объема в уплотнительном канале соответствует объему вытесняемого воздуха:

$$V_{\text{ВЫТ}} = \Delta V_{\text{ВХ}} - \Delta V_{\text{ВЫХ}} = \frac{\pi}{4} \Delta y (D_{\text{ВХ}}^2 - D_{\text{ВЫХ}}^2)$$

и при

$$\Delta y = y_{\text{К}} \quad V_{\text{ВЫТ}} = \frac{\pi}{4} y_{\text{К}} (D_{\text{ВХ}}^2 - D_{\text{ВЫХ}}^2). \quad (6)$$

Условия расхода воздуха. Вытеснение объема воздуха $V_{\text{ВЫТ}}$ за время t из волокнистой ленты или при прохождении лентой участка $y_{\text{К}}$ уплотнителя со скоростью ее движения $v_{\text{Л}}$ соответствует величине расхода $Q_{\text{Л}}$:

$$Q_{\text{Л}} = \frac{V_{\text{ВЫТ}}}{t} = \frac{V_{\text{ВЫТ}} v_{\text{Л}}}{y_{\text{К}}}. \quad (7)$$

мостоятельную функцию $f(\varepsilon)$ пористости уравнением (4), получаем абсолютное значение коэффициента проницаемости:

С учетом условий проницаемости (5) модель одномерного истечения воздуха из волокнистой ленты в канале уплотнителя (рис. 1) опишется объемным расходом Q_0 по формуле Дарси в общем виде:

$$Q_0 = \frac{K_{\Pi}}{\mu} V_{\text{ВЫТ}} \frac{P_{\text{ВХ}} - P_{\text{ВЫХ}}}{y_{\text{К}}} = \frac{K_{\Pi}}{\mu} V_{\text{ВЫТ}} \frac{\Delta P}{y_{\text{К}}}, \quad (8)$$

где $P_{\text{ВХ}}$ и $P_{\text{ВЫХ}}$ – абсолютное значение давления в объемной волокнистой ленте и в канале уплотнителя с пористой средой, при $P_{\text{ВХ}} = 1$ атм; ΔP – избыточное давление в зоне входа ленты в канал уплотнителя.

Условие элементарных дросселей в ленте. В рассмотренных элементах модели при сжатии продукта вытесняемый воздух проникает вдоль параллелизованных волокон по всей площади поперечного сечения ленты. Поры, образованные межволоконными связями, являются взаимосвязанными в продольном и поперечном (радиальном) направлениях (вызвано недостаточной их параллелизацией). Это позволяет представить систему дросселей (капилляров) с эквивалентным диаметром $d_{\text{Э}}$, расположенных в ленте. Расход воздуха через элементарный дроссель $Q_{\text{Э}}$ в работе [2] выражен через объем элементарного дросселя $V_{\text{Э}}$ и коэффициент формы канала $K_{\text{Ф}}$:

$$Q_{\text{Э}} = V_{\text{Э}} \frac{d_{\text{Э}}^2}{K_{\text{Ф}} \mu} \frac{dP}{dy}, \quad (9)$$

тогда общий расход в рассматриваемой волокнистой системе составит:

$$Q = \frac{\varepsilon S_{\text{К}}}{S_{\text{Э}}} Q_{\text{Э}} = \frac{\varepsilon S_{\text{К}}}{S_{\text{Э}}} V_{\text{Э}} \frac{d_{\text{Э}}^2}{K_{\text{Ф}} \mu} \frac{dP}{dy} = \frac{\varepsilon S_{\text{К}} y_{\text{К}} d_{\text{Э}}^2}{K_{\text{Ф}} \mu} \frac{dP}{dy}, \quad (10)$$

где εS_k – общая площадь пор; S_k – площадь поперечного сечения канала уплотнителя; $\varepsilon S_k/S_3$ – число элементарных дросселей; S_3 – площадь сечения элементарного дросселя; $V_3 = S_3 y_{\ell k}$ – объем одного дросселя.

Эквивалентный диаметр пор d_3 определяется через гидравлический радиус и значение пористости (5) волокнистой ленты

$$d_3 = \frac{\varepsilon}{(1-\varepsilon)S_0} = \frac{(D_{\text{ВЫХ}}^2 - n d_B^2)}{4 n d_B}. \quad (11)$$

Подставив d_3 в формулу (10), учитывая $\frac{dP}{dy} = \frac{\Delta P}{y_{\ell k}}$ и $K_{\phi} = 2$ для цилиндрических волокон, получим:

$$Q = \frac{\varepsilon^2}{(1-\varepsilon)^2 S_0^2} \frac{\varepsilon S_k y_{\ell k}}{K_{\phi} \mu} \frac{\Delta P}{y_{\ell k}} = \frac{(D_{\text{ВЫХ}}^2 - n d_B^2)^3 \Delta P}{128 n^2 d_B^2 \mu}. \quad (12)$$

Определение модели вытеснения воздуха в виде функции избыточного давления. Из условия равенства вытесненного Q_L (7) и объемного расхода Q_0 (8) воздуха, имеем:

$$\frac{V_{\text{ВЫТ}} v_L}{y_{\ell k}} = \frac{K_{\Pi}}{\mu} V_{\text{ВЫТ}} \frac{\Delta P}{y_{\ell k}},$$

откуда получаем давление вытесняемого воздуха:

$$\Delta P = \frac{v_L \mu}{K_{\Pi}}. \quad (13)$$

$$\Delta P = \frac{v_L \mu 16 D_{\text{ВЫХ}}^2}{d_B^2 (D_{\text{ВЫХ}}^2 - n d_B^2)} = \frac{v_L \mu 16 D_{\text{ВЫХ}}^2}{n \pi \gamma_B \left(D_{\text{ВЫХ}}^2 - \frac{4 T_L}{\pi \gamma_B} \right)} = \frac{v_L \mu 4 \pi^2 \gamma_B^2 D_{\text{ВЫХ}}^2}{T_B (\pi \gamma_B D_{\text{ВЫХ}}^2 - 4 T_L)}, \quad (15)$$

где μ – динамический коэффициент вязкости воздуха (при температуре 20°C $\mu = 1,85 \cdot 10^{-4}$ г/м·с); T_L – линейная плотность волокнистой ленты.

Для принятой капиллярной модели, выражение (15), сопротивление движению волокнистого продукта от вытесняемого воздушного потока, при осевом направлении волокнистой ленты существенно. В реальном волокнистом продукте волокна расположены не параллельно оси движения продукта, что вызывает радиальное

Используя значение коэффициента проницаемости (5), в первом приближении имеем значение перепада давлений:

$$\Delta P = v_L \mu \frac{16 D_{\text{ВЫХ}}^2}{d_B^2 (D_{\text{ВЫХ}}^2 - n d_B^2)}. \quad (14)$$

Из уравнений (3) и (4) имеем:

$$d_B^2 = \frac{4 m_{\text{В.К}}}{n y_{\ell k} \pi \gamma_B} = \frac{4 T_L}{n \pi \gamma_B},$$

причем

$$n = \frac{T_L}{T_B},$$

где γ_B – удельный вес волокна, а T_B – развес или линейная плотность волокна.

Из условия отношения массы M ленты к ее длине L , элементарной массы dm к ее участку dy , а также массы $m_{\text{В.К}}$ в канале уплотнителя длиной $y_{\ell k}$ позволяет принять параметр $T_L = \frac{M}{L} = \frac{dm}{dy} = \frac{m_{\text{В.К}}}{y_{\ell k}}$ – развеса ленты. Подставив в уравнение (14) значение диаметра волокна d_B^2 , получаем перепад давлений в ленте:

направление вывода воздуха. В этом случае фактическое сопротивление будет зависеть от извитости волокон, запыленности и т.д. Это увеличение может быть учтено коэффициентом связи объемов ленты на входе и на выходе уплотнителя, выраженным через $\xi = \frac{\Delta V_{\text{ВЫХ}}}{\Delta V_{\text{ВХ}}} = \frac{D_{\text{ВХ}}^2}{D_{\text{ВЫХ}}^2}$. Поэтому, применительно к реальному продукту, формула (15) запишется в виде:

$$\Delta P = \xi \frac{v_l \mu 4 \pi^2 \gamma_B^2 D_{\text{ВЫХ}}^2}{T_B (\pi \gamma_B D_{\text{ВЫХ}}^2 - 4 T_L)} = \frac{D_{\text{ВХ}}^2 v_l \mu 4 \pi^2 \gamma_B^2}{T_B (\pi \gamma_B D_{\text{ВЫХ}}^2 - 4 T_L)}, \quad \xi \geq 1. \quad (16)$$

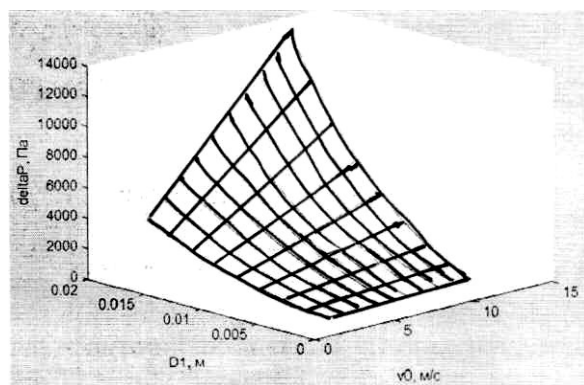
Очевидно, уравнение (16) показывает взаимосвязь технических (конструктивных) параметров уплотняющего устройства, технологических параметров (производительности) с физико-механическими свойствами волокнистой ленты. Отсюда следует, что модель процесса вытеснения воздушной массы из волокнистой ленты (избыточного давления) в общем виде может быть записана функцией:

$$\Delta P = f(v_l, T_L, T_B, D_{\text{ВЫХ}}, D_{\text{ВХ}}, \gamma_B, \mu, \tau), \quad (17)$$

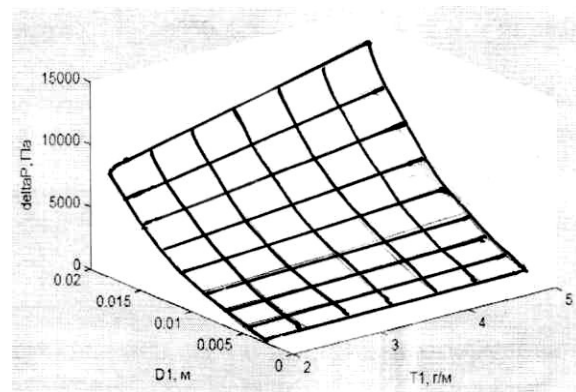
где факторы v_l и T_L, T_B определяются технологическими режимами оборудова-

ния во времени τ ; $D_{\text{ВЫХ}}$ – конструктивный параметр уплотнителя; $D_{\text{ВХ}}, \gamma_B, \mu$ – физические параметры волокнистой ленты.

Решения уравнения (16) в среде Matlab показаны на графиках рис. 2 (графики зависимости избыточного давления ΔP от диаметра ленты $D_{\text{ВХ}}$ ($D1$), в скобках показано обозначение на графике, в зоне входа в уплотнитель, и от: а) скорости движения ленты v_l ($v0$), при $T_L = 4$ г/м; б) от плотности волокнистой ленты, $T_L(T1)$, при $v_l = 10$ м/с).



а)



б)

Рис. 2

Очевидно, функция цели будет характеризоваться диапазоном давлений ΔP вытесняемого воздуха, который зависит от объемной плотности ленты определяемой ее диаметром $D_{\text{ВХ}}$ в зоне входа в уплотнитель. Факторы скорости движения ленты v_l и линейной плотности ленты T_L определяются меньшей их значимостью. Это позволяет предположить, что для преобразователя силы протаскивания ленты необходимо принять условие соотношения диаметров $D_{\text{ВЫХ}}$ и $D_{\text{ВХ}}$ в виде зависимости $D_{\text{ВХ}} = 1,6 D_{\text{ВЫХ}}$. Принятое реализуется известной установкой дополнительной

уплотнительной воронки перед основным уплотнительным элементом.

Приведенный анализ модели выполнен при допущении, что продукт состоит из волокон одинаковой толщины.

ВЫВОДЫ

1. Получена модель вытеснения воздуха из ленты в процессе ее сжатия с учетом факторов, определяемых технологическими режимами оборудования во времени, конструктивных параметров уплотнителя и физико-механических параметров волокнистой ленты.

2. Определены условия минимума перепада давления на входе в уплотнитель ленты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Николаев В.С., Волков В.В., Авроров В.А., Горюнова М.В. Анализ функции преобразования датчика линейной плотности волокнистой ленты тензométrического типа // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2009, №2. С. 83...86.

2. Автоматический контроль и регулирование развеса текстильных материалов / Хавкин В.П.,

Ильин Э.Р., Молчанов А.С. и др. – М., Легкая индустрия, 1975.

3. Шейдеггер А. Э. Физика течения жидкостей через пористые среды. – Гостоптехиздат, 1960. С.276.

4. Wegener W., Bechlenberg K- Neuartige Messrichtungen zur Einleitung der selbsttatigen Materialvergleichmassigung beim Verstrecken // Тех. Прах. – № 1 – 11, 1967.

Рекомендована кафедрой теоретической и прикладной механики. Поступила 15.12.13.
