

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА УПЛОТНЕНИЯ ВОЛОКНИСТОЙ ЛЕНТЫ ПРИ ПРОТЯГИВАНИИ ЕЕ ЧЕРЕЗ УПЛОТНИТЕЛЬ*

MODELING OF THE PROCESS OF THE COMPACTION OF THE STRINGY TAPE AT DRAWING HER(IT) THROUGH SEALANT

В.С. НИКОЛАЕВ, В.В. ВОЛКОВ, Е.А. НЕМКОВА
V.S. NIKOLAEV, V.V. VOLKOV, E.A. NEMKOVA

(Пензенский государственный технологический университет)
(Penza State Technological University)
E-mail: mycolo@rambler.ru

Разработана модель процесса протягивания объемной волокнистой ленты через внутреннюю полость уплотнителя. Проведено моделирование процесса преобразования линейной плотности волокнистой ленты в усилие ее протягивания через уплотнитель с учетом изменения его внутреннего геометрического профиля.

The process model development of the drawing of the three-dimensional stringy tape through internal cavity of the sealant. Organized modeling of the process of the transformation to linear density of the stringy tape in effort of her(its) drawing through sealant with account of the change his(its) internal geometric profile.

Ключевые слова: волокнистая лента, линейная плотность волокнистой ленты, уплотнитель, моделирование сжатия ленты, функция цели, функция преобразований, условия ограничений.

Keywords: stringy tape, linear density of the stringy tape, sealant, modeling of the compression of the tape, function to purposes, function of the transformations, condition of the restrictions.

Моделирование функционирования волокнистой ленты с уплотнителем, имеющим внутренний криволинейный профиль, составляет определенный практический интерес, который обусловлен следующими факторами: первое – это определение оптимального внутреннего профиля уплотнителя – рабочего органа, при силовых взаимодействиях обеспечивающих технологию этого процесса; второе – это определение зоны устойчивости процесса сжатия – протаскивания, что позволит вести оценку весовой нормы волокнистой ленты.

Взаимодействие уплотнительного устройства с волокнистой лентой, представляющей сплошную пористую среду с

упругими свойствами, в физической модели представляет единую механическую систему. Примем допущения: - уплотняющее устройство является абсолютно жестким телом; - волокнистая лента относится к упруго - эластичному телу; - внешние силы, действующие на ленту, определяются силой сжатия, равной силе давления на внутренние стенки уплотнителя и силой трения о внутренние стенки уплотнителя; - при сжатии из ленты выходит воздух, образуя ее пушистость [1]; - внутренние силы действуют внутри волокнистой ленты, являются парными и взаимно уравновешенными.

*Работа выполнена под руководством проф., докт. техн. наук кафедры технологии машиностроения, цикла "Автоматизация и управление" ПензГТУ Прошина И.А.

Допущения определяют модель протягивания волокнистой ленты в виде функции силы протягивания $F_{пр}$, соответствующей силе сжатия $F_{сж}$, зависящей от множества факторов:

$$F_{пр} = F_{сж}(T_L, D_{вх}, D_{вых}, F_{тр}), \quad (1)$$

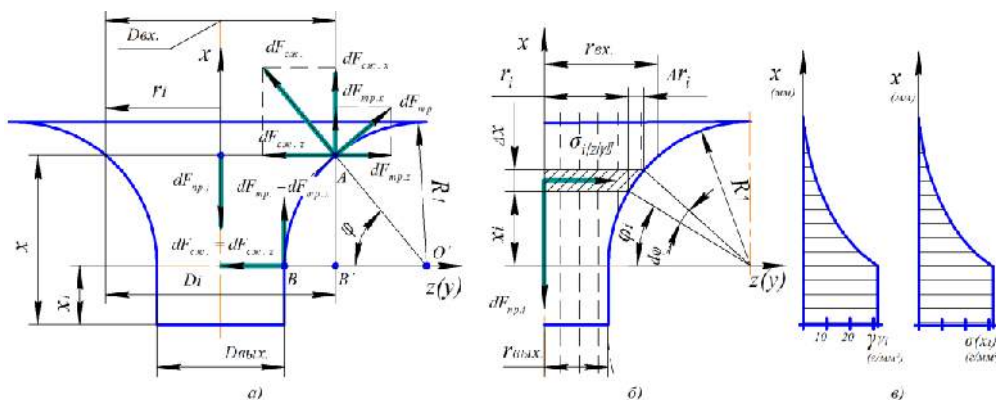


Рис. 1

На рис. 1 представлена расчетная схема модели уплотнитель – волокнистая лента: а) – схема действия сил протягивания, сжатия и трения; б) – схема напряжений в элементарной части объема; в) – схема напряжений и объемной плотности ленты по длине уплотнителя. В точке контакта А (рис. 1-а) проекции силы $dF_{сж}$ на координатные оси z , y и x примут вид $dF_{сж.z}$, $y = -dF_{сж} \cos \varphi$ и $dF_{сж.x} = dF_{сж} \sin \varphi$. Сила трения на элементарной части определяется коэффициентом трения μ и равна $dF_{тр} = \mu dF_{сж}$. Проекция силы трения на координатные оси $z(y)$ и x примут вид $dF_{тр.x} = \mu dF_{сж} \cos \varphi$ и $dF_{тр.z,y} = dF_{сж} \sin \varphi$.

В начале соприкосновения профиля уплотнителя с волокнистой лентой, (рис. 1-а) значение силы сжатия будет мало, то есть $dF_{сж.z,y} \approx 0$ и $dF_{сж.x} \approx 0$. При уменьшении угла φ сила сжатия будет резко возрастать или $dF_{сж.x} \leq dF_{сж.z,y}$. В сравнении с составляющей $dF_{сж.z,y}$ сила $dF_{сж.x}$ является величиной второго порядка малости. Отсюда в модели можно пренебречь величинами $F_{сж.x}$ и $F_{тр.z(y)}$ (аналогичные рассуждения) и их производными. Это определяет условие процесса протаскивания ленты $dF_{сж.z,y} \leq dF_{тр.x}$.

Функцию цели в модели выразим через усилие протягивания, которое зависит от

где T_L – линейная плотность (развес) ленты; $D_{вх}$ и $D_{вых}$ – диаметры внутреннего профиля уплотнителя; $F_{тр}$ – сила трения.

Условие процесса протягивания ленты при действии радиальной сжимающей силы $dF_{сж}$ и силы трения $dF_{тр}$ волокнистой ленты о внутренний криволинейный профиль уплотнителя.

величины линейной плотности волокнистой ленты. Сопротивление протягиванию ленты, из условия ее нерастяжимости, обусловливается действием двух сил сжатия $F_{сж}$ и трения $F_{тр}$. Спроецировав все силы на ось x , элементарной части объема волокнистой ленты, получим силу протягивания:

$$dF_{пр} = dF_{тр.x} = \mu dF_{сж.z,y}. \quad (2)$$

Распределение линейной плотности ленты по длине уплотнителя. Объем ΔV_{Li} элементарной части волокнистой ленты длиной Δx на диаметре D_i внутреннего профиля уплотнителя с учетом удлинения Δr_i радиуса будет $\Delta V_{Li} = 0,25 \pi (D_i + \Delta r_i)^2 \Delta x$ и, пренебрегая величиной Δr_i , ввиду ее малости, имеем:

$$\Delta V_{Li} = 0,25 \pi D_i^2 \Delta x. \quad (3)$$

Примем условия постоянства элементарной массы волокнистой ленты на входе и выходе $\Delta M_{вх} = \Delta M_{Li} = \Delta M_{вых} = \text{const}$ и выразим массу ΔM_{Li} элементарного объе-

ма ΔV_{Li} в сечении волокнистой ленты, состоящей из n_B волокон с удельным весом волокна γ_B и его средним диаметром d_B :

$$\Delta M_{Li} = n_B \Delta V_B \gamma_B = n_B 0,25 \pi d_B^2 \Delta x \gamma_B. \quad (4)$$

$$\gamma_{Vi} = \frac{\Delta M_{Li}}{\Delta V_{Li}} = \frac{n_B \Delta V_B \gamma_B}{\Delta V_{Li}} = \frac{n_B 0,25 \pi d_B^2 \Delta x \gamma_B}{0,25 \pi D_i^2 \Delta x} = \frac{n_B d_B^2 \gamma_B}{D_i^2}. \quad (5)$$

Из условий правильной ориентации n_B волокон в объемной ленте, где линейная плотность T_B волокна диаметром d_B с удельным весом γ_B и массой Δm_B составляет

$$T_B = \frac{\Delta m_B}{\Delta x} = \frac{0,25 \pi d_B^2 \Delta x \gamma_B}{\Delta x} = 0,25 \pi d_B^2 \gamma_B,$$

линейная плотность T_L ее элементарного участка Δx будет $T_L = T_B n_B = 0,25 \pi d_B^2 \gamma_B n_B$, откуда $n_B d_B^2 \gamma_B = T_L / 0,25 \pi$. Подставив значение $n_B d_B^2 \gamma_B$ в уравнение (5), получим объемный вес γ_{Vi} участка i волокнистой ленты через параметр ее линейной плотности T_L :

$$\gamma_{Vi} = \frac{T_L}{0,25 \pi D_i^2} \text{ или } \gamma_{V0} = \frac{T_L}{0,25 \pi D_{Bx}^2}, \quad (6)$$

где γ_{V0} и D_{Bx} – объемный вес и диаметр свободного состояния ленты соответственно.

Связь объемного веса ленты с напряжением сжатия. Исходя из объемной однородности волокнистой ленты, характеризующей механическими константами упругости, эластичности, пластичности, обладающими одинаковыми значениями в любой ее точке, сделаем следующие допущения:

- зависимость между объемной массой ленты и напряжением сжатия линейна;
- эластические и пластические составляющие деформации сжатия малы;

Объемный вес γ_{Vi} элементарного сечения волокнистой ленты в силовом поле уплотнителя отобразим через отношение элементарной массы волокон ΔM_{Li} к их поперечному элементарному объему ΔV_{Li} , соответствующего внутреннего профиля уплотнителя i :

- изменение внутреннего профиля уплотнителя отражает процесс уплотнения волокнистой ленты, который характеризуется относительной деформацией ленты:

$$\varepsilon_D = (D_i - D_{i+1}) / D_i = (1 - D_{i+1} / D_i),$$

где D_i – диаметр участка сечения ленты до деформации; D_{i+1} – диаметр участка сечения ленты после деформации;

- изменения объемного веса γ_{Vi} в исследуемых сечениях уплотнителя характеризуются относительным объемным весом $\varepsilon_\gamma = (\gamma_{Vi+1} - \gamma_{Vi}) / \gamma_{Vi+1}$, где γ_{Vi+1} – объемный вес участка сечения ленты после деформации; γ_{Vi} – объемный вес участка сечения ленты до ее деформации.

Сжимающее напряжение и объемная масса ленты связаны уравнением:

$$\sigma = P_V(\gamma_V),$$

где P_V – оператор связи между напряжением и объемной массой. Вид функции P_V , при удельном давлении в диапазоне 400...1000 Н/м² (407,7...1019 кг/м²) [2], можно представить функцией $\sigma(\gamma_V)$, характеризующей любую физическую точку объема ленты следующего вида:

$$\sigma_i = a \gamma_{Vi} - b, \quad (7)$$

где a и b – эмпирические коэффициенты (постоянны при сжатии и при разгрузке); γ_{Vi} – объемный вес при сжатии.

Физический смысл коэффициентов a и b в том, что в свободном состоянии волокнистая лента имеет объемный вес $\gamma_{V0} = b/a$. Тогда напряжение в ленте сечения i , любой стадии уплотнения, будет:

$$\sigma_i = a(\gamma_{Vi} - \gamma_{V0}),$$

где a – эмпирический коэффициент, зависящий от модуля Юнга, сцепления между волокнами, их упругостью и распрямленностью, влажностью ленты. Из формулы следует, что напряжение соответствует скорости сжатия, которая зависит от изменения объемной массы и характеризует упругие свойства ленты.

Для произвольного сечения статически сила сжатия выражается уравнением:

$$F_{сж.yi} = \int_{S_i} \sigma_i dS,$$

где $S_i = \pi D_i \Delta x$ – площадь контакта волокнистой ленты с профилем уплотнителя в сечении i , тогда сила сжатия примет следующий вид:

$$F_{сж.yi} = \sigma_i \pi D_i \Delta x = a(\gamma_{Vi} - \gamma_{V0}) \pi D_i \Delta x. \quad (8)$$

Уравнения сил (2) выразим равенством интегралов $\int dF_{пр.i} = \mu \int dF_{сж.yi}$, проинте-

$$r_i = r_{вых} + R_1 - \sqrt{R_1^2 - x_i^2} = r_{вых} + R_1 - R_1 \sqrt{1 - x_i^2/R_1^2}. \quad (11)$$

Представим $a = x_i^2/R_1^2$, откуда имеем функцию $f(a) = \sqrt{1-a}$, которую разложим в ряд Маклорена. Ограничившись суммой первых двух членов ряда, получим функ-

$$r_i = r_{вых} + R_1 - R_1 \left(1 - \frac{1}{2} \frac{x_i^2}{R_1^2} \right) = r_{вых} + \frac{1}{2} \frac{x_i^2}{R_1} \text{ или } D_i = D_{вых} + \frac{x_i^2}{R_1}. \quad (12)$$

грировав его и подставив (8), имеем силу протягивания ленты:

$$F_{пр} = \mu F_{сж.z(y)} = \mu a (\gamma_{Vi} - \gamma_{V0}) \pi D_i \Delta x. \quad (9)$$

Статическая связь силы сжатия с развесом волокнистой ленты в поперечном направлении силового поля внутреннего профиля уплотнителя рассматривается из предположения, что взаимодействие ленты и уплотнителя характеризуется определенным натяжением ленты на выходе из уплотнителя и постоянством внутреннего профиля уплотнителя. Подставив в уравнение (9) выражение (6), приведенное к определенному сечению, получим:

$$F_{пр.i} = \mu a 4 T_L \frac{(D_{вх}^2 - D_i^2)}{D_i D_{вх}^2} \Delta x. \quad (10)$$

Описание криволинейного профиля внутренней полости уплотнителя. Внутренний профиль уплотнителя определен радиусом кривизны R_1 и диаметром $D_i = 2r_i$ окружности (рис. 1-б). Стадии сжатия ленты показаны диаметрами $D_{вх} = 2r_{вх}$ – начальная и $D_{вых} = 2r_{вых}$ – конечная.

Геометрический параметр координаты x_i , при заданном диаметре $D_{вых} = 2r_{вых}$ выходного отверстия и R_1 , радиус $r_i = D_i/2$ в любом поперечном сечении уплотнителя имеет следующий вид:

цию $f(a) \approx 1 - \frac{1}{2} a$. Подставив в уравнение (11), получим:

Это выражение является математическим описанием геометрии внутреннего профиля уплотнителя, который регламентирует процесс сжатия ленты. Так, при $x_i = 0$ имеем $r_i = r_{\text{вых}} = D_{\text{вых}}/2$ и при $x_i < R_1$ имеем $r_i^3 \geq r_{\text{вых}}$.

Условия ограничений характеризуются входным диаметром $D_{\text{вх}} = 12 \div 20$ мм и выходным диаметром $D_{\text{вых}} = 2,5 \div 4$ мм волокнистой ленты. Радиальная деформация ленты в уплотнителе происходит от сме-

$$F_{\text{пр},i} = \mu a 4 T_L \frac{D_{\text{вх}}^2 - (D_{\text{вых}} + \frac{x_i^2}{R_1})^2}{(D_{\text{вых}} + \frac{x_i^2}{R_1}) D_{\text{вх}}^2} \Delta x = \mu a 4 T_L \left[\frac{R_1^2}{(R_1 D_{\text{вых}} + x_i^2)} - \frac{(R_1 D_{\text{вых}} + x_i^2)}{D_{\text{вх}}^2} \right] \Delta x. \quad (13)$$

В уравнении (13) $R_1 = \text{const}$ и $D_{\text{вых}}(T_L) = \text{const}$ определяются из конструктивных соображений, а выражение силы протаскивания ленты зависит от координаты x_i профиля уплотнителя. Очевидно, что в уравнении (13) за величину Δx принимаем длину исследуемого

участка наружных и внутренних слоев волокон по отношению к его профилю и изменяется примерно в три - пять раз. Для компенсации резкого утонения волокнистой ленты применяют два последовательно установленных уплотнителя [3], что обеспечивает утонение продукта на последней стадии не более чем в 1,6 раза.

Подставив в уравнение (10) выражение диаметра D_i (12) и проведя соответствующие преобразования, получим:

участка уплотнителя, откуда $x_i = \Delta x$. Два участка, цилиндрический и воронкообразный, с криволинейным профилем, определяют граничные пределы $0 \div x_1 + R_1$ уплотнителя и составляют уравнение. Рассмотренное показывает, что сила протаскивания есть сумма элементарных сил:

$$F_{\text{пр}} = \sum_{i=1}^n F_{\text{пр},i}, \quad (i = \overline{1, n} - \text{число элементарных участков}). \quad (14)$$

$$F_{\text{пр}} = \sum_0^{x_1} F_{\text{пр},i} + \sum_{x_1}^{x_1 + R_1} F_{\text{пр},i} = \mu a 4 T_L \left[x_1 \left(\frac{1}{D_{\text{вых}}} - \frac{D_{\text{вых}}}{D_{\text{вх}}^2} \right) \right]_0^{x_1 = x_1} + (x_1 - x_1) \left(\frac{1}{D_{\text{вых}} + (x_1 - x_1)^2 / R_1} - \frac{D_{\text{вых}} + (x_1 - x_1)^2 / R_1}{D_{\text{вх}}^2} \right) \right]_{x_1 = x_1}^{x_1 = x_1 + R_1}. \quad (15)$$

Полученное есть решение задачи вычисления силы протягивания ленты и при оптимизации внутреннего профиля уплотнителя. Приняв заданные величины $D_{\text{вых}}$, R_1 и $D_{\text{вх}}$ постоянными, привязанными к определенному конструктивному исполнению воронки, получим решение этой задачи в программной среде MATLAB (рис. 2 – зависимость силы протаскивания от плотности волокнистой ленты).

Оценка усилий протягивания волокнистой ленты только через цилиндрический и криволинейный участки уплотнителя показана соответственно на рис. 2-а и б. Откуда следует, что при использовании уплотнителя в качестве преобразователя линейной плотности волокнистой ленты необходимо учитывать нелинейность его профиля.

Дополнительные условия задачи. Зависимость силы протаскивания от плотности

волокнистой ленты $T_L = 3 \dots 5$ г/м и диаметра калиброванного отверстия уплотнителя $D_{\text{вых}} = 2 \dots 4$ мм, при длине калибровочных отверстий $x_1=8$ мм и $x_1=12$ мм, представлена соответственно на рис. 2-в и г.

Изменение силы протягивания ленты определяется неравномерностью распределения числа волокон в сечении волокнистой ленты по ее длине и коэффициентом трения. Необходимо также отметить, что указанные факторы влияния в модели

функции преобразования из-за сложности их теоретического вывода определяются эмпирическим путем. Одновременно требуется осуществить исследования динамической составляющей процесса протягивания волокнистой ленты, характеризуемое временем прохождения рабочей зоны уплотнителя, которое составляет сотые и тысячные доли секунды, что имеет важное значение при высоких скоростях выпуска ленточной машины.

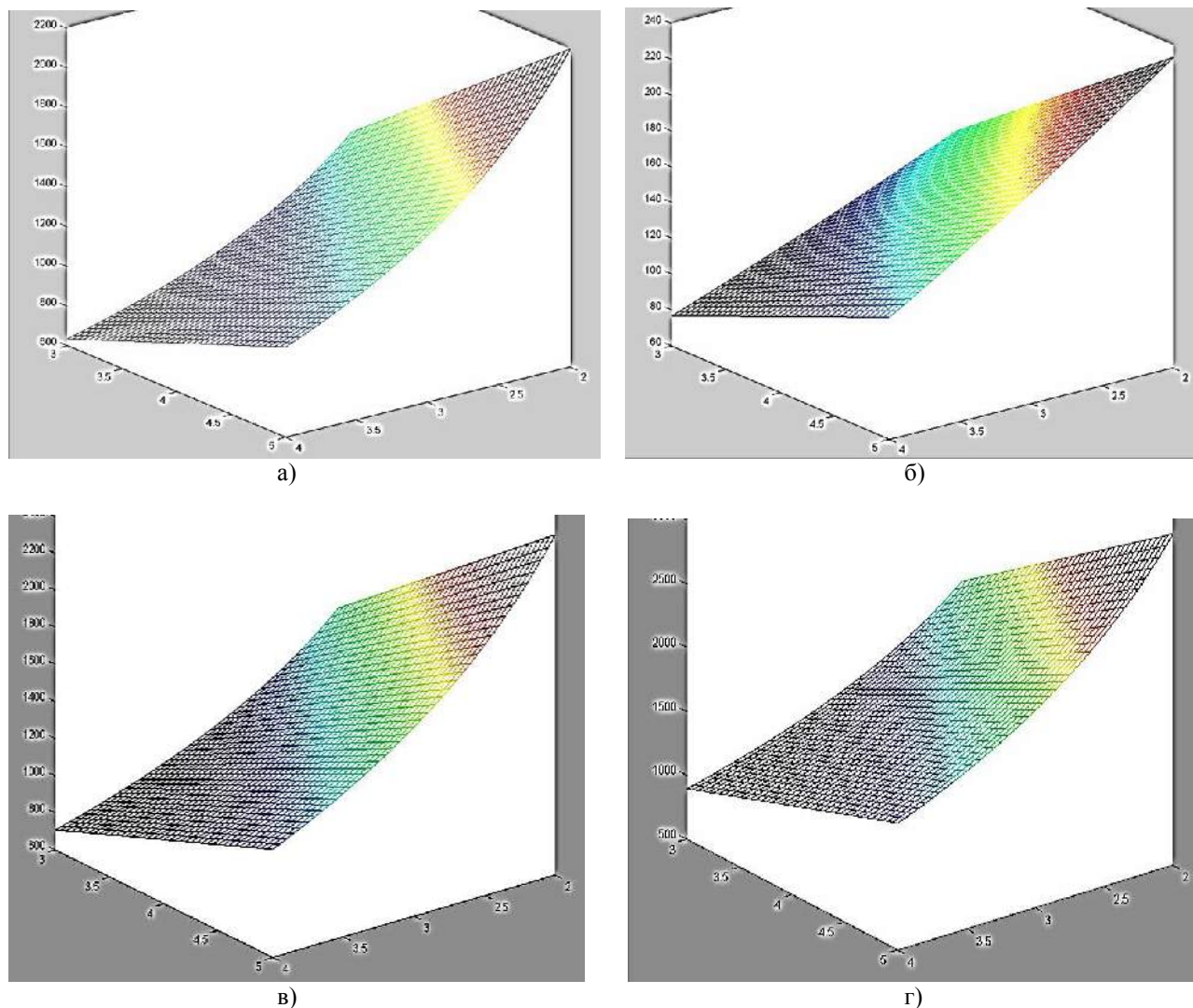


Рис. 2

ВЫВОДЫ

1. Разработана модель процесса протягивания волокнистой ленты через уплотнительный элемент.

2. Исследована функция преобразования линейной плотности ленты в зависи-

мости от усилия ее протягивания через уплотнительный элемент.

ЛИТЕРАТУРА

1. Николаев В.С., Волков В.В., Бочков А.М., Бурков В.В. К вопросу моделирования вытеснения воздуха из объемной волокнистой ленты при ее

сжатии //Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2014, № 1. С.141...146.

2. *Балясов П.Д.* Сжатие текстильных волокон в массе и технология текстильного производства – М. : Легкая индустрия, 1975.

3. *Никифоров О.М.* Влияние уплотнения ленты на распрямленность волокон //Изв. вузов. Техноло-

гия текстильной промышленности. – 1969, № 2. С.48.

Рекомендована кафедрой технологии машиностроения. Поступила 20.03.15.
