

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА,  
СОЗДАВАЕМОГО НИТЕОТВОДНОЙ ВОРОНКОЙ  
ПРИ ФОРМИРОВАНИИ АРМИРОВАННОЙ НИТИ  
ПНЕВМОМЕХАНИЧЕСКОГО СПОСОБА ПРЯДЕНИЯ**

*Р.В. Киселев*

В настоящее время в вооруженных силах стран СНГ, в том числе и Республики Беларусь, большое распространение получила военная форма нового образца, в которой для повышения прочности используются армированные нити.

Армированная нить состоит из сердечника – высокопрочной химической комплексной нити – и волокнистой мычки различного состава, покрывающей ее. Преимущественно для этих целей используются армированные нити кольцевого способа прядения. Главными недостатками данных нитей являются высокая себестоимость и малое содержание комплексной нити в составе армированной, которое не превышает 30 %.

Сотрудниками кафедры ПНХВ разработана новая технология высокопрочных армированных нитей пневмомеханического способа прядения. Данная технология позволяет получать армированные нити с содержанием комплексной полиэфирной нити до 50 %. В результате стало возможным снизить линейную плотность армированной нити при сохранении той же прочности. Кроме того, в отличие от армированной нити кольцевого способа прядения, хлопковый компонент прочно закреплен на сердечнике, что позволяет не применять скручивание в два сложения, сокращая технологический процесс. Еще одним преимуществом является высокая производительность пневмомеханического способа прядения [1].

В процессе формирования разработанной армированной нити прочность волокнистой составляющей, обкручивающей сердечник, сообщается при помощи ложного кручения. Крутильным органом ложного кручения выступает нитеотводная воронка со специальной фрикционной поверхностью. Для обеспечения стабильного технологического процесса с минимальной обрывностью необходимо чтобы крутящий момент, создаваемый нитеотводной воронкой, был максимален.

Для определения крутящего момента сначала необходимо определить зависимость натяжения волокнистой составляющей от угла охвата воронки.

Рассмотрим стационарное движение волокнистой составляющей. Введем неподвижную систему координат. Ось  $Oz$  направим по оси камеры в сторону движения волокнистой составляющей. Плоскость  $xOy$  совпадает с плоскостью, где лежит баллонизирующий участок. Обозначим  $B_1$  – точка входа волокнистой составляющей на поверхность,  $B_2$  – точка схода с нее. Участок нитеотводной воронки, которой касается волокнистая составляющая, представляет собой поверхность тора, уравнение которого можно записать в виде:

$$\bar{r} = (R_2 - R_1 \cdot \cos \psi)(\bar{i} \cos \varphi_1 + \bar{j} \sin \varphi_1) + R_1 (1 - \sin \psi) \bar{k}, \quad (1)$$

где  $R_1$  – радиус скругления воронки;  $R_2$  – расстояние от оси камеры до центра скругления;  $\bar{r}$  – радиус-вектор точек поверхности;  $\bar{i}$ ,  $\bar{j}$ ,  $\bar{k}$  – единичные векторы;  $\varphi_1$  и  $\psi$  – криволинейные координаты на поверхности.

Геометрический смысл координат  $\varphi_1$  и  $\psi$  понятен из рисунка 1.

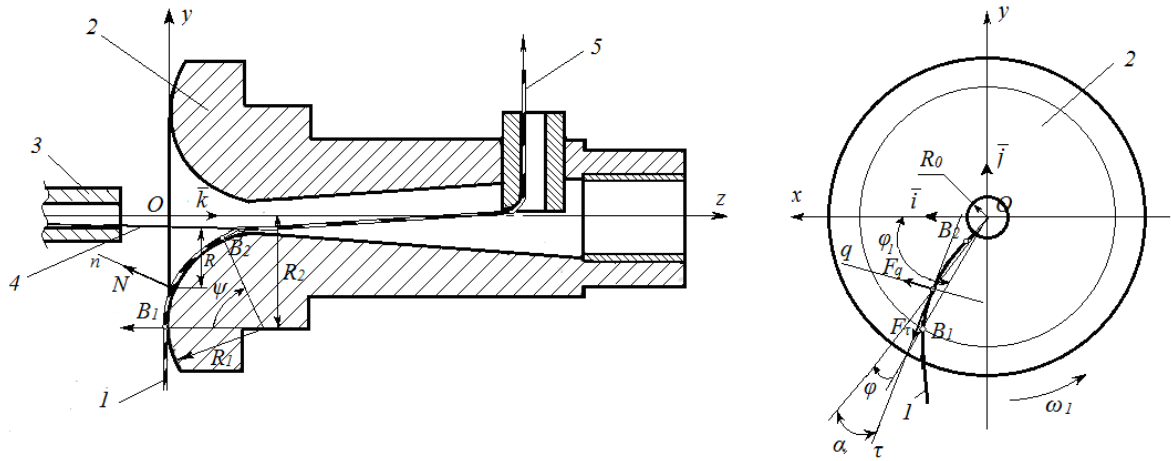


Рисунок 1 – Положение волокнистой составляющей армированной нити на нитеотводной воронке:

1 – волокнистая составляющая; 2 – нитеотводящая воронка; 3 – питающая трубка; 4 – комплексная нить; 5 – армированная нить

Кроме угла  $\varphi_1$ , отсчитываемого от неподвижной оси  $Ox$ , введем угол  $\varphi$ , отсчитываемый от оси, вращающейся вместе с поверхностью и проходящей через точку  $B_2$ .

Между углом  $\varphi_1$ , отсчитываемым от неподвижной оси, и углом  $\varphi$  имеется простая связь:

$$\varphi = \varphi_1 + \omega_1 t,$$

где  $t$  – время, причем функция  $\varphi(\psi)$  не зависит от времени.

Выберем в качестве базисных векторов орты, связанные с нитью. В качестве одного из них возьмем орт касательной к оси нити  $\bar{\tau}$ , в качестве другого – орт  $\bar{q}$ , ортогональный к  $\bar{\tau}$  и лежащий в плоскости, касательной к поверхности.

Тогда уравнения стационарного движения нити по поверхности тела вращения [2] для тороидальной поверхности примут вид:

$$-(T - mu^2) \frac{1}{R_1} \left( \frac{z'}{R} \cos^2 \alpha - \frac{R''z' - R'z''}{R_1^2} \sin^2 \alpha \right) + m\omega_1 z' (R\omega_1 + 2u \cos \alpha) / R_1 \pm N = 0; \quad (2)$$

$$\frac{dT}{ds} + m \left[ \omega_1^2 (RR'/R_1^2) \sin \alpha + u du/ds \right] + F_\tau = 0, \quad (3)$$

$$(T - mu^2) \left( \frac{R'}{RR_1} \cos \alpha - \frac{d\alpha}{ds} \right) - m \frac{R'\omega_1}{R_1} (2u + R\omega \cos \alpha) - F_q = 0, \quad (4)$$

$$\frac{dM}{ds} \pm \delta F_q - N \delta_1 \text{sign} \omega = 0, \quad (5)$$

$$\frac{d\varphi}{ds} = \frac{\sin \alpha}{R}; \quad \frac{d\psi}{ds} = \frac{\cos \alpha}{R_1}, \quad (6)$$

где  $T$  – натяжение волокнистой составляющей, Н;  $m$  – линейная плотность волокнистой составляющей, текс;  $u$  – скорость нити в продольном направлении, м/с;  $\alpha$  – угол между касательной к оси волокнистой составляющей и касательной к окружности  $\varphi = \text{const}$ , рад;  $\omega_1$  – угловая скорость вращения нити относительно поверхности, рад/с;  $s$  – Эйлера

дуговая координата (длина формы волокнистой составляющей);  $M$  – крутящий момент внешних сил, отнесенный к единице длины волокнистой составляющей (Н·м);  $F_\tau, F_q$  – проекция силы трения на направления  $\bar{\tau}$  и  $\bar{q}$ , Н;  $\delta$  – радиус волокнистой составляющей, м;  $\delta_I$  – коэффициент трения качения, м.

Тогда

$$R = R_2 - R_1 \sin \psi; \quad z = R_1 (1 - \cos \psi), \quad (7)$$

Принимаем, что сила трения определяется законом Амонтона, то есть:

$$\bar{F} = -\mu N \bar{v}_0 / v_0, \quad (8)$$

где  $\bar{v}_0$  – вектор скорости точек волокнистой составляющей относительно поверхности ( $v_0$  – модуль этого вектора);  $\mu$  – коэффициент трения.

Проекция силы трения на  $\bar{\tau}$  и  $\bar{q}$ :

$$F_\tau = -\mu N v_{0\tau} / v_0; \quad F_q = -\mu N v_{0q} / v_0, \quad (9)$$

$$v_{0\tau} = u - V_\tau = u + R\omega_1 \cdot \sin \alpha; \quad v_{0q} = \omega\delta - V_q = \omega\delta + \omega_1 \cdot R \cdot \cos \alpha, \quad (10)$$

где  $V_\tau, V_q$  – проекции вектора скорости на направления  $\bar{\tau}$  и  $\bar{q}$ ;

$$v_0 = \sqrt{u^2 + (\omega_1 R)^2 + (\omega\delta)^2 + 2\omega_1 R(u \sin \alpha + \omega\delta \cos \alpha)}. \quad (11)$$

Согласно [3], сила инерции оказывает малое влияние на волокнистую составляющую, поэтому ею можно пренебречь, то есть  $m \cong 0$ . Величиной  $\omega\delta$  также можно пренебречь, поскольку величина угловой скорости  $\omega$  принимает значение, близкое к величине угловой скорости камеры  $\omega_1$ , а следовательно ошибка от пренебрежения по сравнению с  $\omega R \cos \alpha$  не превышает 2 %.

Тогда с учетом сказанного, а также выражений (6), (9), (10), (11), взяв в качестве независимой переменной вместо дуговой координаты  $s$  координату  $\psi$ , получим следующую систему дифференциальных уравнений, в общем виде описывающих стационарное движение волокнистой составляющей по поверхности нитеотводящей воронки:

$$\frac{dT}{d\psi} = \frac{\mu TR_1 \left( \frac{R_2}{R_1} \cos^2 \alpha - \cos \psi \right)}{R v_0 \cos \alpha} \cdot (u + \omega R \sin \alpha); \quad (12)$$

$$\frac{d\alpha}{d\psi} = -\frac{R_1}{R} \operatorname{tg} \alpha \sin \psi - \frac{\mu TR_1 \left( \frac{R_2}{R_1} \cos^2 \alpha - \cos \psi \right)}{TR v_0} (\omega_1 R); \quad (13)$$

$$\frac{dM}{d\psi} = -\frac{\delta \mu TR_1 \left( \frac{R_2}{R_1} \cos^2 \alpha - \cos \psi \right)}{R v_0 \cos \alpha} \omega_1 R \cos \alpha + \frac{\delta_1 TR_1 \left( \frac{R_2}{R_1} \cos^2 \alpha - \cos \psi \right)}{R \cos \alpha}; \quad (14)$$

$$\frac{d\varphi}{d\psi} = \frac{R_1}{R} \operatorname{tg} \alpha. \quad (15)$$

Для решения данной системы уравнений должны использоваться граничные условия в точках  $\psi = 0$  и  $\psi = \psi_I$ , где  $\psi_I$  – значение угла  $\psi$  в точке схода волокнистой составляющей с поверхности воронки. В точке  $\psi = \psi_I$  можно считать, что касательная к оси волокнистой составляющей параллельна касательной к окружности  $\varphi = \operatorname{const}$ . Следовательно, получаем граничное условие:

$$\alpha|_{\psi=\psi_1} = 0; \quad (16)$$

Натяжение волокнистой составляющей  $T_0$  на участке баллонирования позволяет получить второе граничное условие:

$$T|_{\psi=0} = T_0. \quad (17)$$

Третье и четвертое граничные условия:

$$\varphi|_{\psi=0} = 0; \quad M|_{\psi=0} = 0. \quad (18)$$

Аналитическое решение системы дифференциальных уравнений (13 – 16) не выражается через элементарные функции, поэтому задачу в общем случае необходимо решать с помощью ЭВМ. С помощью программы Mathcad получены решения системы дифференциальных уравнений (13 – 16) для волокнистой составляющей линейной плотности 37 текс при следующих данных: частота вращения камеры 40000 мин<sup>-1</sup>, скорость выпуска армированной нити 50 м/мин, радиус скругления  $R_1$  варьировался в пределах от 4 до 10 мм, радиус  $R_2$  подсчитывался по формуле  $R_2 = R_1 + R_0$ , где  $R_0$  изменялось от 1 до 1,5 мм. Значение коэффициент трения изменялось от 0,2 до 0,5.

Угол охвата  $\psi$  принимался от 0 до 1,2 рад.

На рисунке 2 представлена зависимость натяжения волокнистой составляющей и сообщаемого ей крутящего момента от геометрических размеров нитеотводной воронки. Расчет проводился при коэффициенте трения  $\mu = 0,3$ .

Из рисунка 2 следует, что как увеличение радиуса скругления, так и уменьшение отверстия воронки ведут к снижению натяжения волокнистой составляющей, а также к снижению крутящего момента. Следовательно, для создания максимального крутящего момента необходимо использовать воронки меньшего радиуса с большим отверстием. Измеренные значения натяжения близки к расчетным.

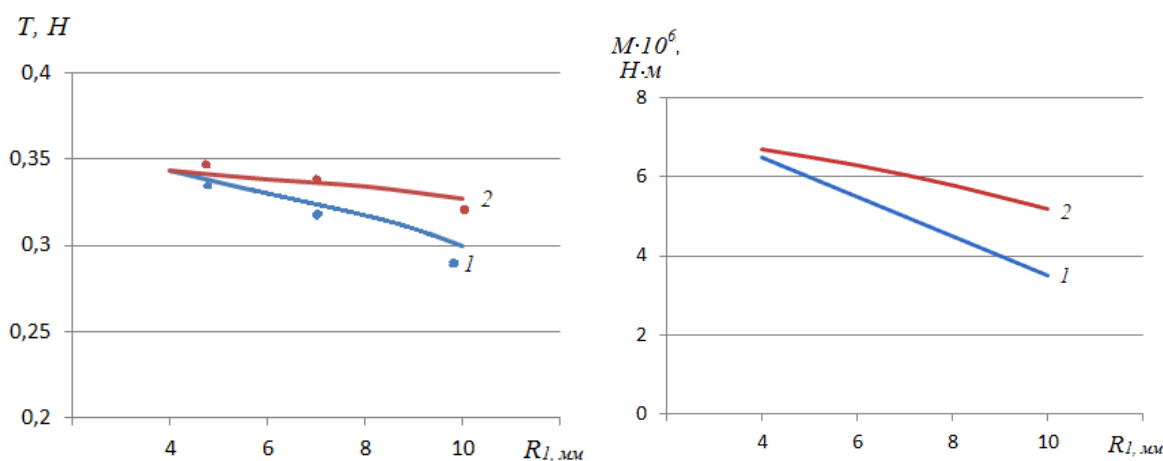


Рисунок 2 – Расчетные зависимости натяжения волокнистой составляющей и сообщаемого ей крутящего момента от геометрических размеров нитеотводящей воронки (точками показаны измеренные значения): 1 –  $R_0 = 1$  мм, 2 –  $R_0 = 1,5$  мм

На рисунке 3 представлены расчетные зависимости натяжения волокнистой составляющей и величины сообщаемого ей крутящего момента от коэффициента трения поверхности нитеотводящей воронки. Данные зависимости представлены для воронки с  $R_1 = 6$  мм и  $R_0 = 1,5$  мм.

Крутящий момент возрастает с увеличением  $\mu$ , однако очевидно, что при больших коэффициентах трения (больших 0,4) возрастание практически прекращается. По мере увеличения коэффициента трения увеличивается составляющая силы трения, направленная поперек волокнистой составляющей, но одновременно происходит

уменьшение самой силы трения из-за убывания натяжения. При малых значениях коэффициента трения  $\mu$  преобладающим является первый фактор, а с ростом коэффициента трения увеличивается влияние второго фактора. Отсюда можно сделать вывод, что для увеличения крутящего момента использование воронок с коэффициентом трения больше 0,4 нецелесообразно.

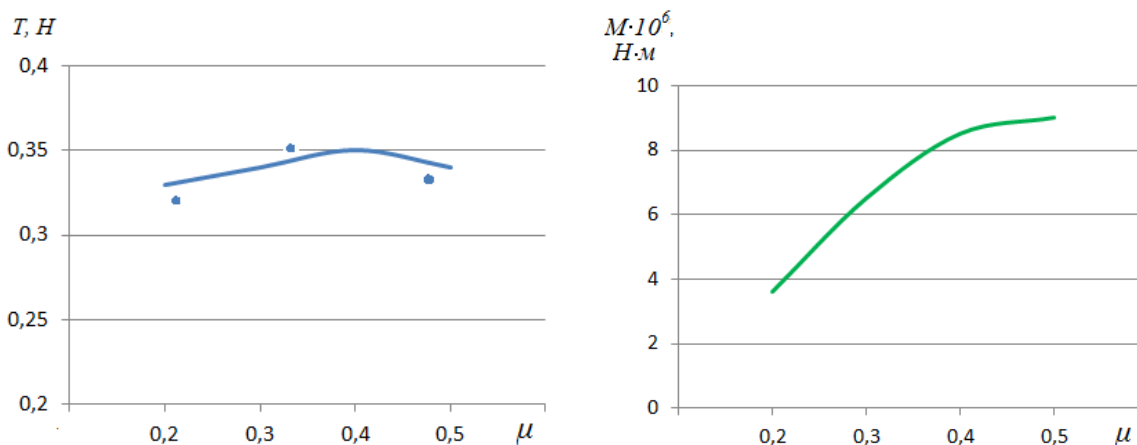


Рисунок 3 – Расчетные зависимости натяжения волокнистой составляющей и величины сообщаемого ей крутящего момента от коэффициента трения поверхности нитеотводящей воронки (точками показаны измеренные значения)

Необходимо отметить, что увеличение коэффициента трения с 0,2 до 0,4 вызвало увеличение крутящего момента более чем в два раза. Для проверки данной зависимости проводился эксперимент. Использовались керамические воронки с различной шероховатостью поверхности, и, следовательно, с различными коэффициентами трения:  $\mu = 0,22$ ,  $\mu = 0,33$ ,  $\mu = 0,48$ . Величина коэффициента трения определялась на стенде по следующей методике. Через воронку пробрасывалась нить линейной плотности 37 текс, к обоим концам которой подвешивались грузы различной массы. Масса грузов подбиралась таким образом, чтобы нить перешла из состояния покоя в движение. Далее по формуле Эйлера определялся коэффициент трения:

$$\mu = \frac{\ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right)}{\varphi_0}, \quad (19)$$

где  $T_2$  – натяжение ведущей ветви нити, Н;  $T_1$  – натяжение ведомой ветви нити, Н;  $\varphi_0$  – угол охвата нитью воронки.

Расчетные данные совпадают с практически измеренными.

На рисунке 4 представлена форма волокнистой составляющей, рассчитанная по формулам (13 – 16) при коэффициентах трения  $\mu = 0,2$  и  $\mu = 0,5$ . По результатам расчетов получено, что при  $\mu = 0,2$  угол  $\alpha_1$  в точке  $B_1$  входа на поверхность воронки составляет 0,39 рад, а при  $\mu = 0,5$  угол  $\alpha_2$  в этой же точке составляет 0,7 рад. При увеличении коэффициента трения форма волокнистой составляющей становится более изогнутой.

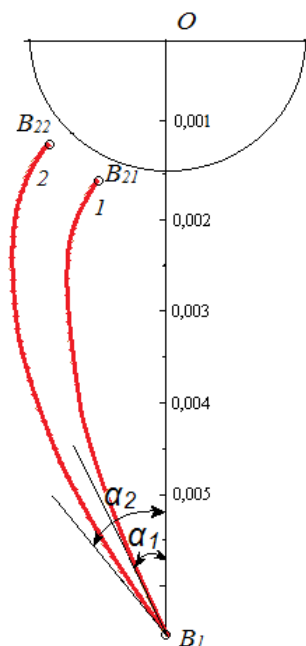


Рисунок 4 – Расчетная форма волокнистой составляющей на поверхности нитеотводящей воронки при различных коэффициентах трения:  $1 - \mu = 0,2$ ,  $2 - \mu = 0,5$

Таким образом, для того, чтобы создать максимальную ложную крутку на волокнистой составляющей, необходимо использовать нитеотводящие воронки малого радиуса с большим отверстием и коэффициентом трения  $\mu = 0,4$ . Это позволит значительно снизить обрывность в процессе выработки армированной нити. Воронки, используемые для получения обычной хлопчатобумажной пряжи, имеют низкий коэффициент трения ( $\mu = 0,15 - 0,2$ ), поэтому использоваться для этой цели не могут.

#### Список использованных источников

1. Киселев, Р. В. Технология получения комбинированных хлопкохимических нитей и их использование в ткачестве / Р. В. Киселев, С. С. Гришанова, А. Г. Коган // Вестник Витебского государственного технологического университета / УО «ВГТУ»; гл. ред. В. С. Башметов. – 2011. – Вып. 21. – С. 57 – 63.
2. Каган, В. М. Взаимодействие нити с рабочими органами текстильных машин / В. М. Каган – Москва : Легкая промышленность, 1984. – С. 27 – 29.
3. Мигушов, И. И. Механика текстильной нити и ткани : моногр. / И. И. Мигушов, А. Н. Соловьёв, С. М. Кирюхин. – Москва : Легкая и пищевая пром-сть, 1984. –130 с.

*Статья поступила в редакцию 12.10.2012.*

#### Выходные данные

---

Киселев, Р. В. Определение крутящего момента, создаваемого нитеотводной воронкой при формировании армированной нити пневмомеханического способа прядения / Р. В. Киселев // Вестник Витебского государственного технологического университета . – 2013. – № 24. – С. 22.