

## **РАЗРАБОТКА КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ ТЕКСТИЛЬНЫХ ОТХОДОВ**

**Локтионов А.В., Жерносек С.В., Соколова А.С.**

*In this work the valuation of possibility of using non-woven fabrics flax Belarusian enterprises is given, the prospects of using textile waste and the calculation of kinematic parameters of the actuators in its processing are worded, the dynamics of interaction between needle sets with fibrous waste in the process of carding is explored, the calculation of kinematic parameters of the actuators is introduced.*

Применение отходов текстильной промышленности позволяет решить проблемы рационального использования сырья, создания практически безотходных технологий, расширения ассортимента текстильных изделий и области применения нетканых полотен, уменьшения экономических потерь от накопления отходов, а также решения экологических проблем, связанных с их хранением и утилизацией. Нетканые материалы широко используются в различных отраслях: швейной, обувной, мебельной, медицинской, автомобильной, строительной и др.

Зарубежные производители для формирования нетканых материалов предлагают широкий спектр технологий и оборудования, во многих случаях отвечающих самым высоким требованиям. Высокая стоимость предлагаемого оборудования и сложность его адаптации к условиям отечественного производства являются предпосылкой разработки технологических аспектов формирования нетканых материалов из хлопковых, шерстяных волокнистых отходов, а также отходов химических волокон.

Для производства нетканых материалов и пряжи большой линейной плотности, применяются текстильные отходы различной природы, физико-механические свойства которых существенно влияют на качество и область применения готовых изделий. Текстильные отходы, пригодные для переработки в нетканые материалы и пряжу, а также изделия различного назначения образуются на разных этапах их производства и при переработке вторичных материальных ресурсов. В зависимости от состояния исходного сырья разрабатываются рекомендации по составу смесей для последующего технологического процесса их переработки.

В Республике Беларусь существуют благоприятные условия для широкого производства льна и изделий из него. Источниками сырья являются льноперерабатывающие предприятия, а также предприятия по получению и переработке химических волокон и нитей: ковровые объединения Бреста и Витебска, Пинское ПО «Полесье», Кобринская фабрика «Ручайка», ПКФ «Слоним», Оршанский льнокомбинат и другие; имеется большой опыт получения нетканых материалов. Однако, из-за отсутствия необходимых технологий и оборудования текстильные отходы не используются. При этом более 50% нетканых материалов, используемых промышленностью Беларуси, импортируется из-за рубежа. Предприятия-производители, используя местную сырьевую базу и при незначительной модернизации установленного оборудования, могут выпускать конкурентоспособную продукцию. Сегодня необходимо реструктуризировать ассортимент, выпускать тонкую, имеющую спрос у состоятельного населения, модную высококачественную льняную одежду и белье, обеспечить средний класс дешевыми льносодержащими тканями, более эффективно использовать отходы, образующиеся в процессе производства. Например, следует развивать возможности их нетекстильного использования – как нетканые материалы различного назначения, композиционные, тепло- и звукоизоляционные.

Особое значение в настоящее время во всем мире уделяется созданию новых синтетических волокон, обладающих уникальным сочетанием различных свойств. Российская компания C-Airlaid разработала технологию выработки целого ряда синтетических волокон, которые позволяют получать материалы с заданными физико-химическими характеристиками для швейной, обувной, мебельной, медицинской, автомобильной, строительной и др. отраслей.

Технологические отходы и вторичные материальные ресурсы составляют около 25% всего перерабатываемого в мире текстильного сырья. Необходимо дальнейшее совершенствование технологического процесса производства нетканых материалов, в частности, такого этапа, как кардочесание, при котором происходит разделение комплексов волокон на отдельные волокна, удаление сорных примесей и порочков, смешивание волокон и выравнивание волокнистого потока. Для получения качественного прочеса отходов, содержащих льняные волокна, необходимо исследовать исполнительные механизмы, осуществляющие переход волокон с приемного барабана на главный.

На рис. 1 представлена расчетная схема сил, действующих на волокно. Подвижная система координат ( $XOY$ ) связана с вращающимся приемным барабаном 1.

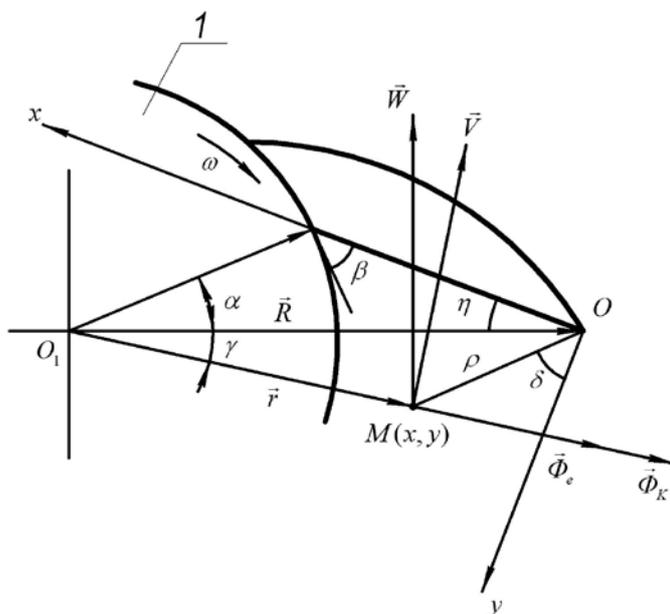


Рис. 1. Расчетная схема сил, действующих на волокно (точка  $M$ )

Движущееся волокно массы  $m$  рассматриваем как материальную точку  $M$ , текущие координаты которой определяются из выражений  $x = \rho \sin \delta$ ,  $y = \rho \cos \delta$ , где  $\rho$  – радиус-вектор точки  $M$ ,  $\delta$  – угол между радиус-вектором точки  $M$  и осью  $OY$ . Дифференциальные уравнения относительного движения точки  $M$  для процесса кардочесания в проекции на оси координат  $XOY$

$$\begin{cases} m\ddot{x} = W_x + \Phi_{ex} + \Phi_{kx}, \\ m\ddot{y} = W_y + \Phi_{ey} + \Phi_{ky}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\sum \vec{F} = \vec{W}$  – сила давления воздушного потока;  $\vec{\Phi}_e$  – переносная сила инерции;  $\vec{\Phi}_k$  – сила инерции Кориолиса.

Давление воздушного потока  $\vec{W}$  находим из условия удержания волокна

зубьями приемного барабана (рис.2). На рис.2  $F_{mp} = \mu N$ , где  $\mu$  – коэффициент трения волокнистой массы о переднюю поверхность зуба гарнитуры;  $N$  – реакция передней поверхности зуба на волокнистую массу.

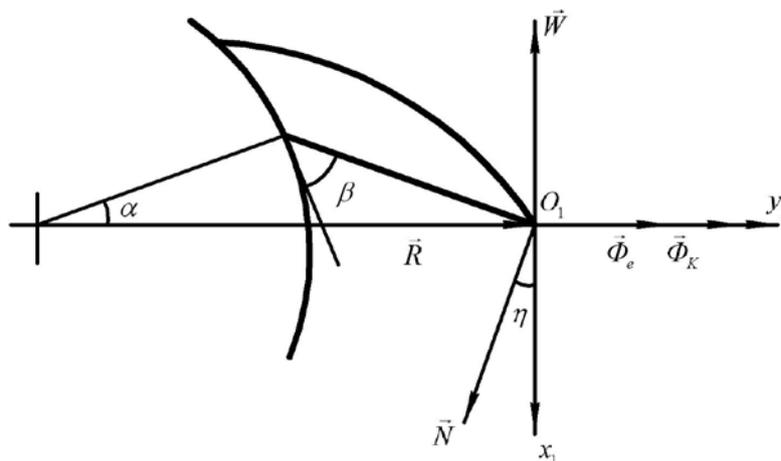


Рис. 2. Расчетная схема сил, действующих на зуб гарнитуры

При изучении процесса перехода волокон с главного на приемный барабан получена система дифференциальных уравнений, учитывающая зависимости координат  $x$  и  $y$  по оси зуба от угловой скорости  $\omega$  приемного барабана, угла  $\eta$ , образуемого координатными осями, связанными с зубом и барабаном, коэффициента трения волокнистой массы  $\mu$  о переднюю поверхность зуба гарнитуры и радиуса  $R$  вершины зуба гарнитуры[1]:

$$\begin{cases} \ddot{x} + 2\omega\dot{x} = \omega^2 x \cos \eta \sin \eta + \omega^2 y \cos^2 \eta + A, \\ \ddot{y} + 2\omega\dot{y} = \omega^2 y \cos \eta \sin \eta + \omega^2 x \sin^2 \eta + B, \end{cases} \quad (2)$$

где  $A = -\frac{\mu\omega^2 R}{\sin \eta + \mu \cos \eta}$ ,  $B = \frac{\omega^2 R}{\sin \eta + \mu \cos \eta}$ , где  $\mu$  – коэффициент трения волокнистой массы о переднюю поверхность зуба гарнитуры,  $\eta$  – угол между вектором  $\vec{N}$  и осью  $O_1X_1$ ,  $N$  – реакция передней поверхности зуба на волокнистую массу.

При решении системы дифференциальных уравнений второго порядка с постоянными коэффициентами (2) выполняются сложные математические расчеты по определению четырех постоянных интегрирования [1]. Необходимо разработать более простой и эффективный метод решения уравнений (2). Поэтому целесообразно иметь метод расчета кинематических механизмов, который позволил бы избежать сложных математических операций, в частности, нахождения постоянных интегрирования и получить математические модели рассматриваемого процесса, оценить степень влияния различных параметров оборудования (угол поворота, геометрия рабочих органов) и коэффициентов трения различных текстильных отходов на движение волокна. Предложен метод с использованием преобразований Лапласа, который удобен тем, что позволяет перейти от операции интегрирования к умножению, что значительно упрощает решение громоздких уравнений, в том числе и на ЭВМ.

Преобразованием Лапласа – это соотношение, ставящее функции вещественного переменного  $x(t)$  в соответствие функцию комплексного переменного  $X(s)$ , где  $s = \sigma + j\psi$  – комплексная переменная:

$$X(s) = L\{x(t)\},$$

где  $L$  – оператор Лапласа. При этом функция  $x(t)$  называется оригиналом, а функция  $X(s)$  – изображением.

Поскольку движение волокна определяется изменением координат  $X$  и  $Y$  во времени, положим, что в начальный момент времени волокно находится в точке с координатами  $X = 0, Y = 0$ . Входным параметром является координата  $Y$ , отражающая процесс растаскивания, а перемещение волокна по зубу задается, как выходной параметр, координатой  $X$ . Процесс расщипывания осуществляется в зависимости от движения волокна по зубу. Передаточные функции  $W1$  и  $W2$  в форме изображений Лапласа представляют дифференциальные уравнения, которые связывают текущие координаты  $X$  и  $Y$  материальной точки – элемента волокна [5].

По свойству о дифференцировании оригинала, дифференцирование функций  $\ddot{x}$  и  $\ddot{y}$  сводится к умножению функций  $W1$  и  $W2$  на комплексные переменные. После алгебраических преобразований система дифференциальных уравнений (2) имеет вид

$$\begin{cases} W1 = \frac{L^2 + 2\omega L - \omega^2 \cos \eta + \frac{\mu \omega^2 R}{\mu \cos \eta + \sin \eta}}{\omega^2 \cos^2 \eta}, \\ W2 = \frac{\omega^2 \sin^2 \eta}{L^2 + 2\omega L - \omega^2 \cos \eta \sin \eta - \frac{\omega^2 R}{\mu \cos \eta + \sin \eta}}. \end{cases} \quad (3)$$

Координаты  $X$  и  $Y$  определяются из уравнений [6]

$$X = \frac{W2}{1 - W1 \cdot W2}; Y = \frac{W1}{1 - W1 \cdot W2}. \quad (4)$$

При анализе полученных математических моделей (3) и (4) следует учитывать тот факт, что при измерениях физических процессов и явлений в реальных условиях возникает ситуация, когда применение упрощенных моделей не приводит к желаемому результату. Необходимо проводить анализ средних значений изучаемых физических параметров. Чтобы принятая математическая модель являлась адекватной, необходимо выделить область или множество, которое состоит лишь из тех значений выходных параметров изучаемой системы, погрешность которых не превышает предельно допустимых. Во многих задачах для этого целесообразно сужать интервал времени, который непосредственно отражает изучаемый физический процесс.

Процесс расщипывания характеризуется высокой интенсивностью. Силы, действующие очень короткий промежуток времени, в механике корректно рассматривать как силы, действующие мгновенно, но имеющие конечный импульс. При аналитическом описании данные силы представлены в виде импульсной функции, рассматриваемой в короткий промежуток времени. Выделим массу  $m$  непрерывно движущегося волокна, сосредоточенную в точке  $M$  пространства  $R_n$ . Начало координат совместим с положением точки  $M$  в начальный момент времени. Тогда силы, действующие на волокно, будут приложены в точке  $M$ . Их поведение в окрестности точки  $M$  представлено кусочно-непрерывной функцией  $\sigma_1$  (рис. 3), действующей в промежуток времени  $t$  от  $0$  до  $h$ , а в остальных случаях равной нулю [2].

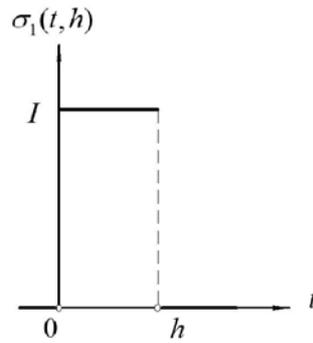


Рис. 3. Зависимость кусочно-непрерывной функции от времени

Кусочно-непрерывную функцию  $\sigma_1(t, h)$  можно записать в виде:

$$\sigma_1(t, h) = \frac{1}{h} [\sigma_0(t) - \sigma_0(t-h)] = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ I, & 0 \leq t \leq h, \\ 0, & h < t \end{cases} \quad (5)$$

где  $I$  – импульс функции  $\sigma_1(t, h)$ .

При  $h \rightarrow 0$  функция  $\delta(t)$  определяется как предел функции  $\sigma_1(t, h)$ :

$$\delta(t) = \lim_{h \rightarrow 0} \sigma_1(t, h). \quad (6)$$

Функция  $\delta(t)$  отражает характер действия мгновенных сил приложенных к точке  $M$  в короткий промежуток времени взаимодействия волокна и поверхности зуба. Данная функция является обобщенной и ее нельзя рассматривать как функцию, заданную общим определением математического анализа [4, 7]. На рис. 4 представлен график обобщенной функции  $\delta(t)$ , полученной при предельном переходе от кусочно-непрерывной функции  $\sigma_1$  [3]:

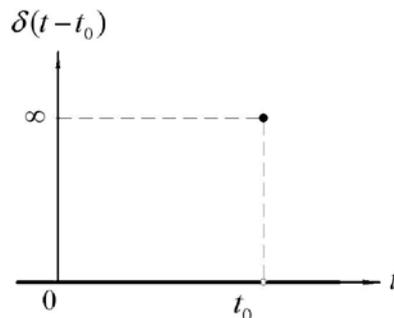


Рис. 4. Зависимость обобщенной функции  $\delta(t)$  от времени

После подстановки уравнений (3) и (4) с учетом (6) в математический пакет MAPLE получены координаты  $X$  и  $Y$  при  $t \rightarrow 0$

$$\begin{aligned} x(t) &= 0,092 \sinh(-54,172t) e^{-4,49t}, \\ y(t) &= 0,08 \cdot \delta(2, t) + 0,718 \cdot \delta(1, t) - \\ &- 6379,171 \sinh(-54,172t) e^{-4,49t} + 190,785 \cdot \delta(t). \end{aligned} \quad (7)$$

При решении приняты следующие расчетные параметры: высота зуба пильчатой гарнитуры – 40 мм; угол наклона передней грани  $\beta$  –  $60^\circ$ ; радиус вершин зуба гарнитуры  $R$  – 103 мм; угол  $\eta$  между вектором  $\vec{N}$  и осью  $O_1X_1$  –  $28^\circ 50'$ , угловая

скорость приемного барабана  $\omega - 4,49 \text{ с}^{-1}$ , коэффициент трения волокнистой массы о переднюю поверхность зуба гарнитуры  $\mu - 0,7$ .

Уравнения (7), характеризующие процесс расщипывания, имеют достаточно простой вид по сравнению с решением системы дифференциальных уравнений второго порядка с постоянными коэффициентами (2). Установлено, что функция  $Y(t)$  возрастает несколько медленнее, чем функция  $X(t)$ . При этом волокно стремится оторваться от гарнитуры приемного барабана – значительно снижается интенсивность взаимодействия гарнитуры с волокном и, как следствие, интенсивность расщипывания волокнистых отходов в зоне приемного барабана. Для стабилизации процесса расщипывания целесообразно создать дополнительный воздушный поток, который направлял бы разрабатываемые волокна в рабочую зону приемного барабана.

Решая систему уравнений (7), получим уравнение траектории  $s(t)$  при движении материальной точки  $M$  (волокна), которое имеет вид

$$s(t) = 0,08 \cdot \delta(2,t) + 0,718 \cdot \delta(1,t) + 6379,171 \cdot \sinh(54,172 \cdot t) \cdot \exp(-4,49 \cdot t) + 190,786 \cdot \delta(t). \quad (8)$$

График траектории движения волокна  $s(t)$ , заданной выражением (8), представлен на рис. 5

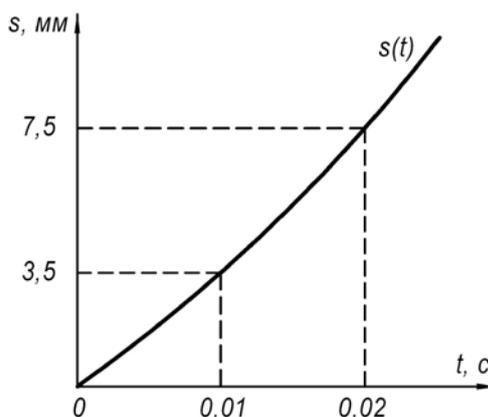


Рис. 5. Зависимость траектории  $s(t)$  движения волокна от времени

Из графика (рис. 4) видно, что траектория движения точки  $M$  представляет собой возрастающую функцию, проходящую через точку  $(0,0)$  и близкую к прямой.

Дифференцируя уравнения (7), получим проекции скорости на оси координат в виде

$$\begin{cases} v_x = 5 \cdot \cosh(54,172 \cdot t) \cdot \exp(-4,49 t) - 0,414 \cdot \sinh(54,172 \cdot t) \cdot \exp(-4,49 t), \\ v_y = 0,08 \cdot \delta(3,t) + 0,718 \cdot \delta(2,t) + 3,456 \cdot 10^5 \cdot \cosh(54,172 \cdot t) \cdot \exp(-4,49 t) - \\ - 28642,479 \cdot \sinh(54,172 \cdot t) \cdot \exp(-4,49 t) + 190,786 \cdot \delta(1,t). \end{cases} \quad (7)$$

При этом скорость точки  $M$   $v(t)$  определяется из выражения

$$v(t) = [25 + (0,078 \cdot \delta(3,t) + 0,718 \cdot \delta(2,t) + 345572,052 + 190,786 \cdot \delta(1,t))^2]^{1/2}. \quad (8)$$

Зависимость скорости движения волокна от времени представлена на рис. 6

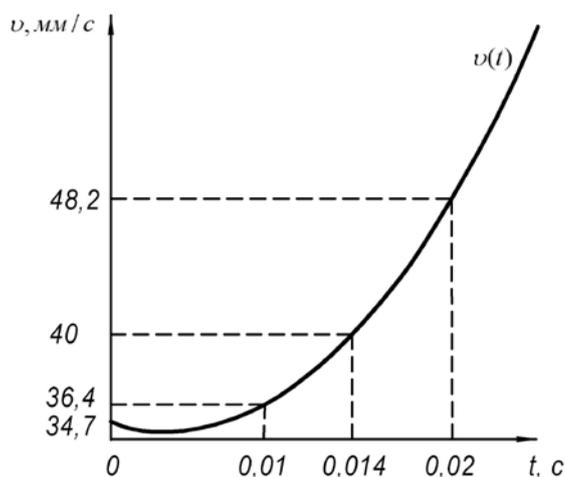


Рис. 6. Зависимость скорости движения волокна от времени

Из рис.6 зависимости скорости материальной точки  $M$  от времени  $t$  можно сделать вывод, что в начальный момент времени скорость волокна равна  $v_0 = 34,7$  мм/с. Вид кривой  $v(t)$  представляет часть параболы. Вначале график функции  $v(t)$  является убывающим – скорость точки  $M$  несколько уменьшается. Этот промежуток характеризует время взаимодействия волокна и поверхности зуба. На данном отрезке времени существенное влияние оказывают силы трения волокна о металлическую поверхность зуба. В результате взаимодействия с зубом волокно приобретает значительную кинетическую энергию, выбрасывается из зоны разволокнения и с ускорением направляется в приемную зону.

С учетом (8), проекции ускорения точки  $M$  на оси координат определяются из уравнений

$$\begin{cases} a_x = 272.72 \cdot \sinh(54.172 \cdot t) \cdot \exp(-4.49 t) - 44.9 \cdot \cosh(54.172 \cdot t) \cdot \exp(-4.49 t), \\ a_y = 0.08 \cdot \delta(4, t) + 0.718 \cdot \delta(3, t) + 1.885 \cdot 10^7 \cdot \sinh(54.172 \cdot t) \cdot \exp(-4.49 t) - \\ - 3.103 \cdot 10^6 \cdot \cosh(54.172 \cdot t) \cdot \exp(-4.49 t) + 190.786 \cdot \delta(2, t). \end{cases} \quad (9)$$

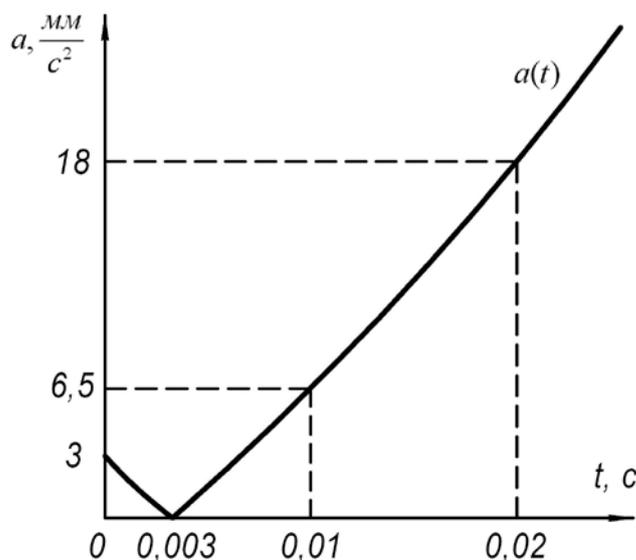


Рис. 7. График зависимости ускорения движения волокна от времени

Ускорение точки  $M$  от времени определяется из уравнения

$$\begin{aligned}
a(t) = & \left[ \{272.7195429 \cdot \sinh(54.17193557 t) \cdot \exp(-4.49 t) - 44.89985408 \cdot \right. \\
& \left. \cdot \cosh(54.17193557 t) \cdot \exp(-4.49 t)\}^2 + \{0.07997434730 \cdot \delta(5,t) + \right. \\
& \left. 0.7181696387 \cdot \delta(4,t) + 1.035015565 \cdot 10^9 \cdot \cosh(54.17193560 t) \cdot \exp(-4.49 t) - \right. \\
& \left. - 2.527399701 \cdot 10^8 \cdot \sinh(54.17193560 t) \cdot \exp(-4.49 t) + 190.7855020 \cdot \delta(3,t)\}^2 \right]^{1/2}.
\end{aligned}
\tag{10}$$

Зависимость ускорения движения волокна от времени представлена на рис. 7.

График  $a(t)$  представляет собой ломаную кривую (рис. 7). Из рис. 7 следует, что в начальный момент времени ускорение волокна  $a_0 = 3 \text{ мм} / \text{с}^2$ . Затем функция  $a(t)$  за короткий промежуток времени убывает до нуля (точка излома при  $t = 0,003 \text{ с}$ ) и начинает возрастать. Сравнивая графики  $v(t)$  и  $a(t)$ , можно отметить их одинаковое поведение в короткий отрезок времени скольжения волокна по поверхности зуба, где имеют место силы трения  $\bar{F}_{mp}$  волокна о переднюю поверхность зуба. Из графиков  $v(t)$  и  $a(t)$  следует, что в промежуток времени  $t$  от 0 до 0,003 с волокно скользит по поверхности зуба в направлении схода. Силы трения при этом стремятся удержать волокно. Максимальное значение сила трения  $\bar{F}_{mp}$  имеет в момент времени  $t = 0,003 \text{ с}$ . Затем волокно под действием значительного запаса энергии сходит с зуба, силы трения перестают оказывать влияние. Скорость и ускорение возрастают и материальная точка  $M$  (волокно) удаляется от поверхности зуба. На движение волокна при расщипывании влияют возникающие в зоне взаимодействия силы трения. На рис.8 представлен график изменения силы трения в зависимости от угла  $\eta$  (рис.2).

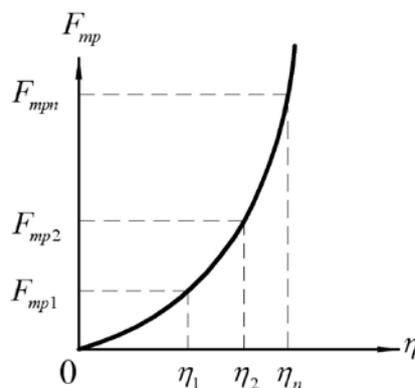


Рис. 8. График зависимости силы трения  $\bar{F}_{mp}$  от угла  $\eta$

Следовательно, в процессе расщипывания при увеличении угла  $\eta$  (рис. 8) силы трения возрастают. Силы трения зависят не только от физических свойств соприкасающихся тел, но и от геометрических параметров зуба (рис. 1), в частности от угла  $\eta$ .

### Выводы

1. Оценка и перспективы использования сырья в производстве нетканых материалов представляют интерес для предприятий Республики Беларусь, где имеется сырьевая база и заинтересованные потребители.

2. Дифференциальные уравнения второго порядка с использованием постоянных интегрирования для расчета кинематических параметров исполнительных механизмов при переработке текстильных отходов имеют громоздкий вид и необходимы

сложные математические преобразования для составления программы их расчета на ЭВМ.

3. Расчет кинематических параметров исполнительных механизмов при переработке текстильных отходов с использованием преобразований Лапласа позволяет избежать сложных математических операций по нахождению постоянных интегрирования, разработать математические модели рассматриваемого технологического процесса и оценить степень влияния различных параметров оборудования (угла поворота, геометрии исполнительных механизмов) и коэффициентов трения текстильных отходов на движение волокна.

## ЛИТЕРАТУРА

1. А.В. Локтионов. Динамика взаимодействия игл гарнитуры с волокнистыми отходами в процессе кардочесания / Локтионов А.В., Буткевич В.Г., Мачихо Т.А. // Вестник Полоцкого государственного университета «Фундаментальные науки». – Новополоцк: УО «ПГУ», 2004. - №11. - С. 98-102.
2. В.В. Ершова. Импульсные функции. Функции комплексной переменной. Операционное исчисление / Ершова В.В. Под ред. Азаматовой В.И. – Минск: «Вышэйш. школа», 1976. – 256 с.
3. В.А. Баженов. Строительная механика. Специальный курс. Применение метода граничных элементов / Баженов В.А, Оробей В.Ф., Дашенко А.Ф., Коломиец Л.В. – Одесса: Астропринт, 2001. – 288 с.
4. В.С. Владимиров. Обобщенные функции в математической физике / Владимиров В.С. Изд-е 2-е, испр. и дополн. Серия: «Современные физико-математические проблемы». - М.: «Наука», 1979. – 320 с.
5. А.В. Локтионов. Исследование кинематических параметров исполнительных механизмов при переработке текстильных отходов с использованием преобразований Лапласа / Локтионов А.В., Мачихо Т.А., Жерносек С.В. // Материалы докладов ХLI научно-технической конференции преподавателей и студентов университета. – Витебск: УО «ВГТУ», 2008. – С.37-39.
6. Я.З. Цыпкин. Основы теории автоматического управления. / Цыпкин Я.З. - М.: «Наука», 1977.- 560 с.
7. С.В. Жерносек. Применение дельта-функции при переработке текстильных отходов / Жерносек С.В., Соколова А.С., Локтионов А.В. // Тезисы докладов ХLII научно-технической конференции преподавателей и студентов университета. – Витебск: УО «ВГТУ», 2009. - С. 41-42.