

УДК 677.017.2/.7

DOI 10.47367/0021-3497_2021_4_60

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОДНООСНОГО РАЗРЫВА
СОВОКУПНОСТИ ВОЛОКОН С УЧЕТОМ ИХ СВОЙСТВ
НА МАШИНЕ КОПРОВОГО ТИПА**

**MODELING OF SINGLE-AXIS RUPTURE PROCESS
FIBER TOTALS WITH REGARD TO THEIR PROPERTIES
ON A COPPER-TYPE MACHINE**

А.В. ОРЛОВ, Е.Л. ПАШИН

A.V. ORLOV, E.L. PASHIN

**(Костромской государственной университет,
Костромская государственная сельскохозяйственная академия)**

**(Kostroma State University,
Kostroma State Agricultural Academy)**

E-mail: aorlov@list.ru; evgpashin@yandex.ru

Разработана программа для моделирования процесса одноосного разрыва волокна на машине копрового типа с учетом особенностей движения маятника и разрушения испытуемого волокнистого пучка. Результаты моделирования соответствуют общепризнанным закономерностям. Возникающие отклонения результатов виртуального измерения, сформированных программной системой при моделировании, от исходно заданных режимно-конструктивных параметров машины могут использоваться в качестве показателя качества ее работы при метрологической аттестации. На основании разработанного алгоритма предлагается создание аппаратно-программного комплекса, обладающего интерфейсом подключения, идентичным с используемым на разрывной машине датчиком угла поворота маятника.

A program has been developed to simulate the process of uniaxial fiber fracturing on a coper type machine, taking into account the features of the movement of the pendulum and the destruction of the tested fibrous bundle. The results of the simulation correspond to generally accepted patterns. The resulting deviations of the results of the virtual measurement generated by the software system during modeling from the initially set mode-design parameters of the machine can be used as an indicator of the quality of its work during metrological certification. Based on the developed algorithm, it is proposed to create a hardware-software complex having a connection interface identical to that used on the bursting machine with a pendulum rotation angle sensor.

Ключевые слова: разрывная машина, копер, маятник, моделирование, симуляция, волокно, модель пучка, свойства, разрыв.

Keywords: explosive car, poppet, pendulum, modeling, simulation, fiber, model of a bunch, property, gap.

Известны преимущества динамических испытаний текстильных волокон и нитей [1], [2], обеспечивающих сходство с их реальным нагружением в процессе переработки [3]. Для реализации таких условий при одноосном разрыве разработана разрывная машина копрового типа [4], используемая под названием К-1 в целях стандартизации льняного волокна [5]. Она представляет собой программно-аппаратный комплекс, обеспечивающий косвенное определение разрывного усилия волокон. В основу такого определения положена фиксация и последующая обработка показаний датчика угловых перемещений ЛИР-158Б, представляющего собой относительный инкрементальный энкодер [8].

Однако для эффективного ее использования на практике требуется обеспечить единство условий испытания и поверки основных параметров процесса разрыва, элементов конструкции машины и программной компоненты системы.

В связи с неустранимым и случайным влиянием неоднородности свойств анализируемых волокон создать эталонный образец с заранее известными свойствами оказывается невозможным. Поэтому предложено моделировать свойства анализируемого волокна и процесс испытания с последующим использованием полученных результатов при метрологической аттестации. Для достижения этого требуется решение задач, направленных на:

- определение сил, действующих на маятник копровой машины, и их зависимостей от его положения и скорости движения, создание физической модели движения маятника;
- установление формы сигнала и его свойств, вызванных конструктивными особенностями энкодера;
- разработку алгоритма, позволяющего моделировать процесс испытания, включая движение маятника и разрушение

испытуемого материала, и его реализацию в виде отдельной программной системы;

- создание программно-аппаратного комплекса, обладающего идентичным с используемым на машине энкодером интерфейсом подключения, и реализующего вышеуказанный алгоритм.

Среди сил, действующих на основной элемент конструкции машины маятник, можно в первом приближении идентифицировать силу тяжести и силу сопротивления образца. Используя известное уравнение динамики вращательного тела, можно выразить это следующим образом:

$$I\ddot{\varphi} = M_T + M_{обр} + M_T, \quad (1)$$

где M_T – момент силы тяжести; $M_{обр}$ – момент силы сопротивления образца; $M_{сопр}$ – момент иных сил сопротивления; I – момент инерции маятника; $\ddot{\varphi}$ – угловое ускорение маятника.

Предварительная оценка доли влияния величины $M_{сопр}$ выявила, что в общей сумме моментов, указанных в выражении (1), она составляет не более 3...4%. Это позволяет при последующих расчетах пренебрегать этой составляющей.

Тогда соответствующие моменты сил выражаются через известные характеристики маятника:

$$\begin{aligned} M_T &= -mg \sin \varphi_T, \\ M_{обр} &= F_{обр}(\varphi, \dot{\varphi})r_{обр}, \end{aligned} \quad (2)$$

где m – масса маятника; r_T – расстояние от точки подвеса до центра масс маятника; $r_{обр}$ – расстояние от точки подвеса до точки крепления образца; $F_{обр}$ – сила сопротивления образца; $\varphi, \dot{\varphi}$ – угловая координата и скорость маятника. Здесь и далее считается, что начало отсчета угловой координаты соответствует нижней точке траектории маятника, который движется в направлении возрастания угловой координаты. Деформация

и нагружение волокна начинается по прохождении маятником указанной низшей точки.

Подставив выражения (2) в уравнение движения (1), получаем итеративную формулу для определения углового ускорения маятника:

$$\ddot{\varphi}_i = \frac{F_{\text{обр}}(\varphi_{i-1}, \dot{\varphi}_{i-1})r_{\text{обр}} - mgr_T \sin \varphi_{i-1}}{I}. \quad (3)$$

Однако, как и большинство итеративных симуляций, данный подход требует выбора значения временного шага симуляции Δt . Эта задача осложняется особенностями конструкции энкодера ЛИР-158Б. Он выдает сигнал (выраженный в виде смены напряжения на одном из двух каналов) в ответ на поворот вала датчика с закрепленным маятником на определенный минимальный угол $\Delta\varphi$. Величина этого угла определяется количеством делений на лимбе энкодера. Как следствие, при вращении вала с переменной угловой скоростью сигналы посылаются неравномерно во времени, но равномерно относительно значения угловой координаты. Это означает, что для полноценной симуляции работы датчика угловых перемещений потребуется вычислять временной интервал Δt_i , по истечении которого вал маятника повернется на угол $\Delta\varphi$ относительно предыдущей позиции. Поскольку энкодер ЛИР-158Б выдает 10000 импульсов на один оборот вала [8], можно принять допущение о том, что действующие силы и, как следствие, угловое ускорение маятника разрывной машины за этот интервал времени изменятся незначительно. Тогда для расчета интервала времени Δt можно прибегнуть к использованию закона равноускоренного движения:

$$\frac{\ddot{\varphi}_t \Delta t^2}{2} + \dot{\varphi} \Delta t - \Delta\varphi = 0. \quad (4)$$

В случае если (4) имеет корни, то наименьший положительный из них будет искомым значением Δt_i . Если таких корней нет, то маятник находится в высшей точке траектории, и для определения очередного временного шага Δt_i следует изменить знак

перед $\Delta\varphi$, что будет означать смену направления движения маятника.

Найдя величину Δt_i , согласно (4), и вычислив мгновенное значение $\ddot{\varphi}_t$ согласно (3), можно найти мгновенные значения угловой скорости $\dot{\varphi}_t$ и угловой координаты φ_t :

$$\dot{\varphi}_t = \dot{\varphi}_{t-1} + \ddot{\varphi}_t \Delta t_i, \quad (5)$$

$$\varphi_t = \varphi_{t-1} + \dot{\varphi}_t \Delta t_i.$$

Заметим, что угол зарядки маятника φ_0 и начальная угловая скорость $\dot{\varphi}_0 = 0$ являются известными величинами. Формулы (3)...(5) позволяют определить следующее состояние маятника, зная его предыдущее состояние.

Однако для этого необходимо знать закон изменения силы сопротивления образца $F_{\text{обр}}$ в зависимости от значения угловой координаты и скорости маятника. Для выявления такого закона представим испытываемый образец в виде совокупности большого ($N \gg 100$) количества однотипных механических систем, имитирующих поведение индивидуальных волокнистых комплексов (рис. 1-а), из которых состоит испытываемый образец при их одноосевом разрыве. Каждый из таких комплексов можно представить в виде механической модели согласно [9] в виде соединенных параллельно упругого тела А и демпфера В (рис. 1-б).

На рис. 1 представлены схемы механических систем, имитирующих процесс разрыва волокна.

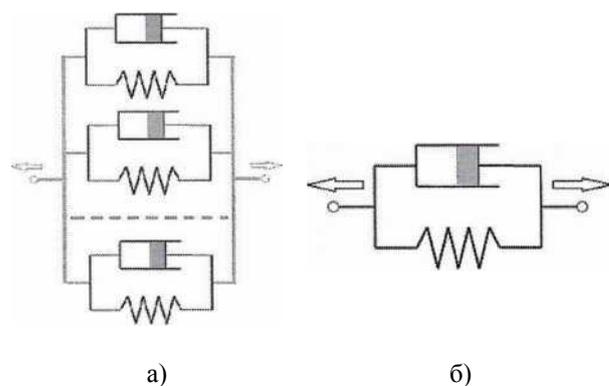


Рис. 1

Упругий элемент оказывает сопротивление пропорционально величине деформации $\varphi_{обр}$, тогда как демпфер оказывает сопротивление пропорционально квадрату скорости деформации $\dot{\varphi}_{обр}$.

Для более точной имитации поведения волокна при разрыве следует учесть еще два обстоятельства. Во-первых, отдельные волокна могут быть натянуты неравномерно. Это можно описать как некую "слабину" $\Delta x_{слаб}$, вычитаемую из величины деформации Δx . Если результирующая раз-

$$F_i(\varphi, \dot{\varphi}) = \begin{cases} 0, & \text{если } \varphi_{обр} \leq \Delta x_{слаб}, \\ A_i(\varphi_{обр} - \Delta x_{слаб}) + B_i(\dot{\varphi}_{обр})^2, & \text{если } \Delta x_{слаб} < \varphi_{обр} \leq \Delta x_{крит} + \Delta x_{слаб}, \\ 0, & \text{если } \varphi_{обр} > \Delta x_{крит} + \Delta x_{слаб}, \end{cases} \quad (6)$$

где A_i – коэффициент пропорциональности для упругой составляющей i -го волокна; B_i – коэффициент пропорциональности для демпфирующей составляющей i -го волокна.

Таким образом, общая сила сопротивления $F_{обр}$ волокон, состоящего из N отдельных волокон, будет определена как сумма сил F_i , то есть $F_{обр}(\varphi, \dot{\varphi}) = \sum_{i=1}^N F_i(\varphi, \dot{\varphi})$. Величины коэффициентов пропорциональности A_i и B_i , используемые в (6), должны быть

окажется нулевой или отрицательной, можно считать что данное волокно не оказывает сопротивления. Во-вторых, каждое волокно имеет предельную величину деформации $\Delta x_{крит}$, после которой происходит его разрушение. После этого разрушенное волокно не будет вносить вклад в совокупное сопротивление растяжению.

Таким образом, величину силы сопротивления отдельного волокна F_i можно описать следующей системой закономерностей:

распределены согласно случайному закону (например, нормальному) относительно выбранного среднего значения. Это позволяет имитировать неоднородность свойств отдельных волокон. Величина N должна быть выбрана исходя из характерного количества волокон в испытуемом образце.

На основе выражений (3)...(6) был разработан алгоритм расчета и на его основе программа для ЭВМ, симулирующие процесс разрыва совокупности волокон (в пучке) с заданными свойствами на предложенной разрывной машине копрового типа.

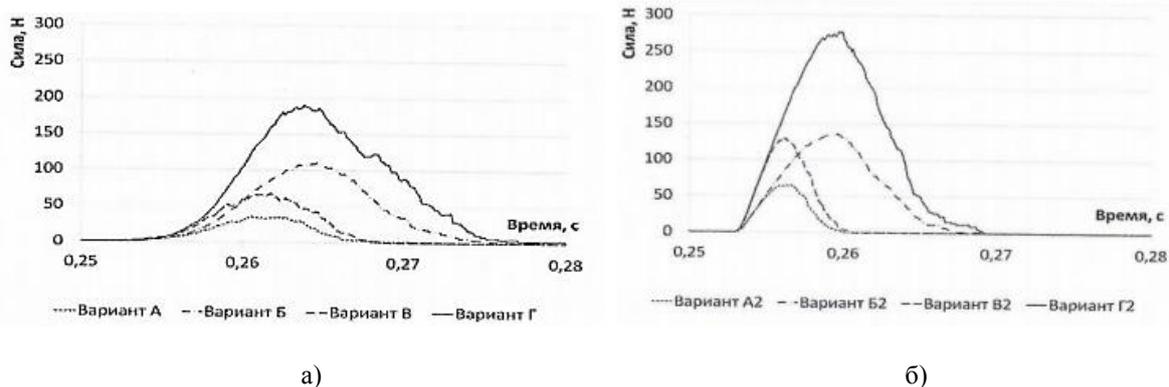


Рис. 2

Примерные результаты симуляции проиллюстрированы на рис. 2 (изменение разрывного усилия моделируемого волокнистого пучка при значительном (а) и незначительном (б) отличиях в натяжении отдельных волокон). Графики получены при

следующих параметрах маятника: масса, $m = 2,78$ кг; момент инерции, $I = 0,105$ кг·м²; расстояние от оси вращения маятника до центра тяжести, $r_n = 0,175$ м; расстояние от оси вращения маятника до зажима волокна $r_{обр} = 0,058$ м; $\varphi_0 = 62^\circ$; $\Delta\varphi = 0,036^\circ$. Харак-

теристиками волокнистого образца подчиняются закону нормального распределения. Количество волокон в пучке $N = 300$ шт, коэффициент пропорциональности B_i имеет математическое ожидание (МО) $\mu_b = 0,1$

$\text{Н} \cdot \text{с}^2/\text{м}^2$ и среднее квадратическое отклонение (СКО) $\sigma_b = 0,01 \text{ Н} \cdot \text{с}^2/\text{м}^2$. Значения остальных параметров приведены в табл. 1 (значения и параметры свойств и условий разрыва моделируемого волокна).

Т а б л и ц а 1

Параметры и характеристики волокна	Значения параметров и характеристик по вариантам модельных опытов							
	А	Б	В	Г	А2	Б2	В2	Г2
μ_A – МО коэффициента А, Н/м	250	250	500	500	250	250	500	500
σ_A – СКО коэффициента А, Н/м	50	50	100	100	50	50	100	100
$\mu_{\text{крит}}$ – МО крит. деформации, мм	1,5	3,0	1,5	3,0	1,5	3,0	1,5	3,0
$\sigma_{\text{крит}}$ – СКО крит. деформации, мм	0,5	1,0	0,5	1,0	0,5	1,0	0,5	1,0
$\mu_{\text{слаб}}$ – МО слабины, мм	3	3	3	3	1	1	1	1
$\sigma_{\text{слаб}}$ – СКО слабины, мм	1,0	1,0	1,0	1,0	0,1	0,1	0,1	0,1

Из анализа графических зависимостей следует соответствие характера изменения сил натяжения и разрывных усилий общепринятым закономерностям [8], [9], что обеспечивает возможность использования предложенного варианта симуляции.

Одним из возможных способов использования данной системы эмуляции для проверки программной компоненты является включение эмулятора вместо фактического энкодера, используемого измерительной системой, как показано на рис. 3 (схема передачи данных в системе измерения при нормальной работе (а) и в режиме проверки (б)).

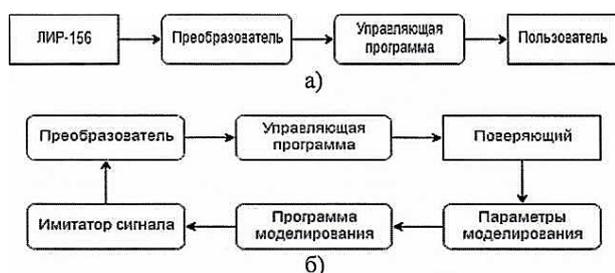


Рис. 3

Свойства сигнала, имитирующего работу датчика, будут определяться характеристиками виртуального "материала", которые гипотетически могут задаваться с достаточной степенью точности. Величина отклонения результатов измерения, продемонстрированных системой, от исходно заданных режимно-конструктивных параметров будет служить показателем качества работы программных компонент системы и

элементов конструкции машины. Значительное отклонение может являться признаком, исключаям единство условий испытания, например, при аттестации машины.

В Ы В О Д Ы

1. Для обеспечения единства условий испытания и проверки основных параметров процесса разрыва волокон на разрывной машине копрового типа предложено моделировать свойства анализируемого волокна и процесс испытания с последующим использованием полученных результатов при метрологической аттестации.

2. После определения сил, действующих на маятник копровой машины, и установления зависимости скорости движения от его положения была найдена итеративная формула для определения углового ускорения маятника в данный момент времени. Это обеспечило разработку алгоритма расчета мгновенного значения угловой скорости и угловой координаты.

3. Используя при симуляции процесса разрыва пучка волокон известную механическую модель в виде совокупности параллельно связанных упругих и демпфирующих звеньев, разработана программа для имитации разрыва с учетом свойств и наличия ненапрянутых волокон в пучке. Результаты моделирования процесса разрыва оказались соответствующими общепринятым закономерностям.

4. Возникающие отклонения результатов виртуального измерения, продемонстрированных системой, от исходно заданных режимно-конструктивных параметров могут использоваться в качестве показателя качества работы программных компонент системы и элементов конструкции разрывной машины при ее аттестации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кудряшова Н.И., Кудряшов Б.А. Высокоскоростное растяжение текстильных материалов. – М.: Легкая индустрия, 1974.
2. Перепелкин К.Е. Структура и свойства волокон. – М.: Химия, 1985.
3. Банакова Н.В., Крутикова В.Р. Анализ параметров технологических процессов приготовительного, ткацкого и трикотажного производств по тензограммам нити // Изв. вузов. Технологическая текстильной промышленности. – 2015, № 5. С.100...105.
4. Орлов А.В., Пашин Е.Л. Принципы функционирования новой инструментальной системы контроля разрывных характеристик волокон и нитей // Мат. Междунар. научн. конф.: "Инновации–2018". – М.: РТУ имени А.Н. Косыгина, 2018. С. 51...55.
5. ГОСТ 9394-76. Волокно льняное короткое. Технические условия (с Изменениями № 1, 2, 3, 4, 5. Последнее изменение 12.09.2018). – М.: Изд-во стандартов, 1987.
6. <https://skbis.ru/catalog/rotary/incremental-rotary-encoders/lir-158>.
7. Мартон В. Е., Херл Д.В.С. Механические свойства текстильных материалов. Манчестер-Лондон, (перевод с англ.). – М.: Легкая индустрия, 1971.
8. Севостьянов П.А., Забродин Д.А., Дасюк П.Е. Компьютерное моделирование в задачах исследования текстильных материалов и производств. – М.: Тисо Принт, 2014.
9. Назаренко Е.В., Рыклин Д.Б., Соколов С.В. Имитационное моделирование процесса растяжения

и разрыва пучка волокон // Вестник Витебского ГТУ. – 2014, № 2, С. 62...69.

REFERENCES

1. Kudryashova N.I., Kudryashov B.A. Vysokoskorostnoe rastyazhenie tekstil'nykh materialov. – M.: Legkaya industriya, 1974.
2. Perepelkin K.E. Struktura i svoystva volokon. – M.: Khimiya, 1985.
3. Banakova N.V., Krutikova V.R. Analiz parametrov tekhnologicheskikh protsessov prigotovitel'nogo, tkatskogo i trikotazhnogo proizvodstv po tenzogrammam niti // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti. – 2015, № 5. S.100...105.
4. Orlov A.V., Pashin E.L. Printsipy funktsionirovaniya novoy instrumental'noy sistemy kontrolya razryvnykh kharakteristik volokon i nitey // Mat. Mezhdunar. nauchn. konf.: "Innovatsii–2018". – M.: RTU imeni A.N. Kosygina, 2018. S. 51...55.
5. GOST 9394-76. Volokno l'nyanoe korotkoe. Tekhnicheskie usloviya (s Izmeneniyami № 1, 2, 3, 4, 5. Poslednee izmenenie 12.09.2018). – M.: Izd-vo standartov, 1987.
6. <https://skbis.ru/catalog/rotary/incremental-rotary-encoders/lir-158>.
7. Marton V. E., Kherl D.V.S. Mekhanicheskie svoystva tekstil'nykh materialov. Manchester-London, (perевod s angl.). – M.: Legkaya industriya, 1971.
8. Sevost'yanov P.A., Zabrodin D.A., Dasyuk P.E. Komp'yuternoe modelirovanie v zadachakh issledovaniya tekstil'nykh materialov i proizvodstv. – M.: Tiso Print, 2014.
9. Nazarenko E.V., Ryklin D.B., Sokolov S.V. Imitatsionnoe modelirovanie protsessa rastyazheniya i razryva puchka volokon // Vestnik Vitebskogo GTU. – 2014, № 2, S. 62...69.

Рекомендована кафедрой технических систем в АПК Костромской ГСХА. Поступила 31.05.21.