ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСТЯЖЕНИЯ И РАЗРЫВА ПУЧКА ВОЛОКОН

Е.В. Назаренко, Д.Б. Рыклин, С.В. Соколов

УДК 677.017.31

РЕФЕРАТ

ПУЧОК ВОЛОКОН, РАСТЯЖЕНИЕ ПУЧКА ВОЛОКОН, РАЗРЫВ ПУЧКА ВОЛОКОН, ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ, ДЕФОРМАЦИЯ, ДИАГРАММА РАСТЯЖЕНИЯ, КРИВАЯ «НАГРУЗКА-УДЛИНЕНИЕ», КОЭФФИЦИЕНТ ВАРИАЦИИ

Целью работы является разработка имитационной модели процесса растяжения и разрыва пучка однородных волокон для оценки влияния физико-механических свойств волокон на неодновременность их разрыва и для возможности последующего использования полученной модели при прогнозировании прочностных характеристик пряжи.

Проведено имитационное моделирование процесса растяжения и разрыва пучка волокон на основе данных о растяжении единичных волокон. В результате исследований установлено, что существенное влияние на форму диаграмм растяжения оказывает коэффициент вариации по относительному удлинению, с увеличением которого разрывная нагрузка пучка волокон уменьшается, полное удлинение, соответствующее разрывной нагрузке пучка, уменьшается и возрастает начальный модуль упругости.

ABSTRACT

FIBER BUNDLE, EXTENSION OF THE FIBER BUNDLE, BREAK OF THE FIBER BUNDLE, IMITATING MODEL, DEFORMATION, DIAGRAM OF AN EXTENSION, LOAD–ELONGATION CURVE, COEFFICIENT OF VARIATION

The most important mechanical properties of fibers are their tensile properties under forces and deformations applied along the fiber axis. Of these, the simplest to study experimentally is the elongation and finally the break.

The behaviour of an individual fiber under a gradually increasing applied force is completely expressed by the load–elongation curve with its endpoint breakage. An advantage of a bundle test is that it takes account of variability, which influences on yarn strength.

As a result of the analytical researches imitating model of extension and break of the fiber bundle was developed. It was found that the coefficient of variation of elongation at breaking affects on the form of the diagram of extension of the fiber bundle.

Задача проектирования прочностных характеристик продуктов прядильного производства является одной из главных задач, поскольку показатель разрывной нагрузки позволяет осуществлять контроль качества производства и рассчитывать разрывные характеристики тканей [1].

Существующие методики прогнозирования прочности основаны на использовании эмпирических моделей, отражающих результаты эксперимента в конкретных производственных условиях, либо теоретических моделей, область применения которых ограничивается сложной структурой и использованием параметров, сложно определяемых в реальных условиях. Кроме того, используются полуэмпирические модели, коэффициенты которых имеют определенный физический смысл. Однако для их получения необходимо проведение большого количества экспериментов.

Новейшие информационные технологии позволяют более точно прогнозировать прочностные характеристики продуктов прядильного производства. Поэтому создание современной методики прогнозирования, основанной как на теоретическом, так и на экспериментальном материале с применением методов компьютерного моделирования, является актуальной научной и практической задачей.

Целью работы является разработка математической модели процесса растяжения и разры-

Витебский государственный технологический университет

ва пучка однородных волокон для оценки влияния физико-механических свойств волокон на неравномерность их разрыва. Выполнение поставленной задачи позволит в дальнейшем использовать полученную модель при прогнозировании прочности пряжи. Использование метода имитационного моделирования испытаний дает возможность представить изучаемый процесс в целом и найти общие закономерности.

Деформирование пучка волокон происходит по закономерностям, близким к деформированию отдельных волокон [2]. Однако между этими закономерностями имеются и различия, определяемые различиями в свойствах и расположении волокон в пучке и фрикционным взаимодействием между ними.

В работе Перепелкина К.Е. [2] приведены диаграммы растяжения отдельных волокон, усредненная диаграмма их растяжения и диаграмма растяжения пучка невзаимодействующих друг с другом волокон. Диаграмма растяжения пучка расположена ниже, чем усредненная диаграмма отдельных волокон, ее начальная часть соответствует более низким значениям модуля деформации. Существенным отличием диаграммы растяжения пучка волокон является наличие правой нисходящей ветви, зависящей от неравномерности деформирования и разрушения волокон. Максимум диаграммы растяжения пучка ($\sigma_{П}$) расположен ниже, чем величина среднего разрушающего напряжения волокон ($\sigma_{В}$). Это различие учитывается коэффициентом использования прочности волокон в пучке:

$$\chi = \frac{\sigma_{П}}{\sigma_{В}}. \quad (1)$$

Величина коэффициента использования прочности волокон в пучке всегда меньше единицы и существенно зависит от характера их деформирования и разрушения. Обычно для пучка волокон или некрученой комплексной нити она заключается в пределах от 0,6 до 0,95.

Суммарная работа деформирования до разрыва отдельных волокон и их пучка равны. Следствием этого является равенство площадей под кривыми для усредненной диаграммы растяжения волокон и пучка.

Процесс растяжения волокон и нитей хорошо описывается диаграммами растяжения, на оси абсцисс которых откладываются значения абсолютных или относительных удлинений, а на оси ординат соответствующие им нагрузки (напряжения).

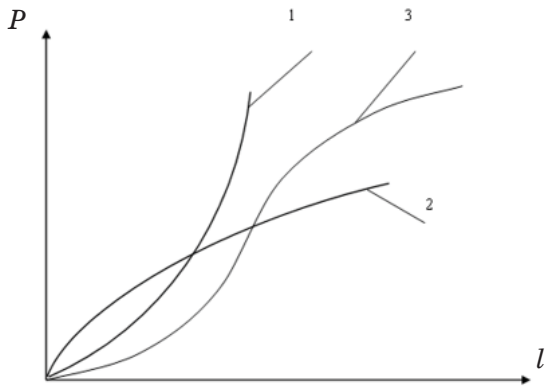


Рисунок 1 – Кривые растяжения различных типов

Из всего многообразия кривых растяжения можно выделить три основных типа [3]:

- тип 1 – таким волокнам и нитям присущи небольшие деформации при высокой прочности, элементы структуры относительно хорошо ориентированы;
- тип 2 – типичным являются большие растяжения и различные прочности, в зависимости от структуры;
- тип 3 – образование кривых этого типа обусловлено тем, что в начале растяжения происходит ориентация структурных элементов, а затем разрушение сложившейся и образование новой структуры, при которой деформация сильно увеличивается.

Для волокон и нитей, состоящих из целлюлозы (натуральных и упрочненных искусственных), характерен первый тип кривых растяжения, для шелка, шерсти и простых искусственных – второй тип, а для ряда химических – третий тип кривых.

Математическое определение зависимости нагрузки (напряжения) от приложенного абсолютного или относительного удлинения позволит моделировать кривые растяжения волокон различных типов, что даст возможность в последующем проводить моделирование процесса растяжения и разрыва пучка волокон.

В большинстве случаев деформационные

Витебский государственный технологический университет

свойства текстильных материалов оцениваются на основании эмпирического анализа экспериментальных данных. Но, как показывает практика, данный метод исследования обладает рядом существенных недостатков, к которым относятся отсутствие физического обоснования получаемых зависимостей и физического смысла отдельных коэффициентов моделей, а также значительные временные затраты по экспериментальному определению параметров получаемых моделей.

С целью исключения вышеизложенных недостатков моделей профессором Кузнецовым А.А. в работе [4] была предложена универсальная математическая модель следующего вида:

$$\sigma = \frac{\varepsilon}{b_0 + b_1\varepsilon} + b_2\varepsilon^2, \quad (2)$$

где σ – напряжение, возникающее при растяжении волокна (нити), Па; ε – относительное удлинение; b_0, b_1, b_2 – параметры модели.

В работе [5] определен физический смысл используемых в модели параметров. Параметр b_0 характеризует упругие свойства волокна (нити) при растяжении, параметр b_1 характеризует пластические свойства волокна, параметр b_2 характеризует упрочняющие свойства волокна:

$$b_0 = \frac{\varepsilon_p}{\sigma_y} = \frac{1}{E_y},\ b_1 = \frac{1}{\sigma_п} - \frac{1}{\sigma_y},\ b_2 = \frac{\sigma_p - \sigma_п}{\varepsilon_p^{\,2}} = \frac{\Delta\sigma_{упр}}{\varepsilon_p^{\,2}}, \quad (3)$$

где σ_y – условный предел упругости или напряжение, при котором произошло бы разрушение абсолютно упругой нити, Па; ε_p – относительное разрывное удлинение, %; E_y – условный модуль упругости, Па; $\sigma_П$ – условный предел пластичности или напряжение, при котором произошло бы разрушение не упрочняющейся нити, Па; $\sigma_{УПР}$ – условный предел упрочнения волокна (нити), Па; σ_P – разрывное напряжение волокна (нити), Па.

С целью определения численных значений параметров модели b_0, b_1, b_2 для исследуемых образцов волокон (хлопкового, льняного, вискозного, полиэфирного) был использован специальный пакет Curve Fitting Toolbox программной среды MatLab, который позволяет приближать данные при помощи параметрических моделей. В качестве исходных данных вводились параметры кривых растяжения различных волокон, приведенные в литературных источниках [6, 7]. По этим данным проводилось построение диаграмм растяжения и приближение к ним кривой, построенной по математической модели (2), с одновременным подбором параметров модели. Критерием точности такого приближения служило значение коэффициента детерминации R2.

В таблице 1 приведены значения параметров b_0, b_1, b_2 для различных видов волокон, а также разрывное удлинение ε_p и разрывное напряжение σ_p, полученные из справочников.

Для возможности моделирования диаграмм растяжения для случайных значений разрывного удлинения и разрывного напряжения можно предложить использование масштабных коэффициентов. В этом случае математическое выражение (2) будет иметь следующий вид:

$$\sigma_{Po} = \frac{1}{K_1}\left(\frac{K_2 \cdot \varepsilon_{Po}}{b_0 + b_1 \cdot K_2 \cdot \varepsilon_{Po}} + b_2 \cdot \left(K_2 \cdot \varepsilon_{Po}\right)^2\right), \quad (4)$$

где ε_{P0} – случайное (задаваемое) разрывное удлинение, %; σ_{P0} – случайное (задаваемое) разрывное напряжение, Па; K_1, K_2 – масштабные коэффициенты:

$$K_1 = \frac{\sigma_P}{\sigma_{Po}},\ K_2 = \frac{\varepsilon_P}{\varepsilon_{Po}}, \quad (5)$$

где ε_P – табличное значение разрывного удлинения, %; σ_P – табличное значение разрывного напряжения, Па (таблица 1).

На основании формулы (4) по данным таблицы 1 могут быть построены кривые растяжения при различных значениях разрывного удлинения и разрывного напряжения.

На основании полученных данных о разрыве единичных волокон была разработана программа по моделированию разрыва пучка волокон.

В окне «Данные» осуществляется ввод параметров: количество волокон в пучке (содержание), тип волокон (хлопковое, вискозное, льняное, полиэфирное), тип и параметры случайного распределения значений разрывного удлинения и разрывной нагрузки (постоянное значение, нормальный закон и Вейбулла).

Витебский государственный технологический университет

Таблица 1 – Характеристики разрыва и параметры модели для различных видов волокон

Тип волокна	ε_p, %	σ_p, $\cdot 10^7$ Па	b_0, $\cdot 10^{-7}$ Па$^{-1}$	b_1, $\cdot 10^{-7}$ Па$^{-1}$	b_2, $\cdot 10^7$ Па	R^2
Хлопковое	5,2	35,8	0,07108	0,09457	0,9784	0,9976
Вискозное	27,5	28,5	0,3864	0,03122	0,008134	0,9994
Льняное	3	76,8	0,07713	0,0481	6,859	0,9958
Полиэфирное	21	55	0,122	0,014	0,013	0,9983

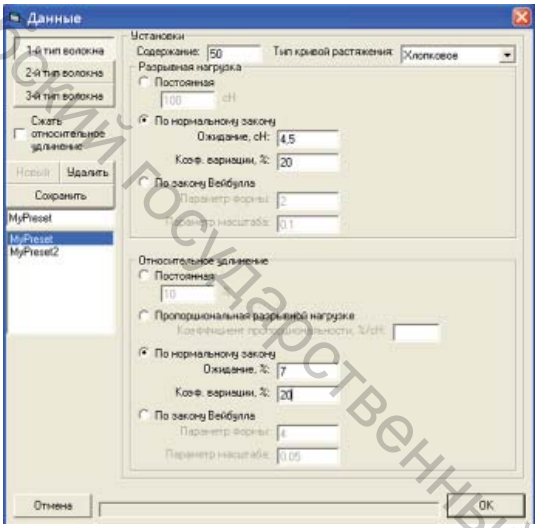


Рисунок 2 – Окно ввода данных для моделирования процесса растяжения

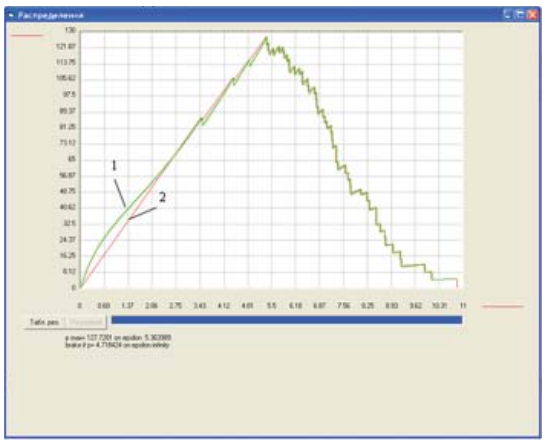


Рисунок 3 – Результаты моделирования разрыва пучка хлопковых волокон
1 – кривая растяжения пучка волокон;
2 – ломаная, соединяющая точки разрыва

По окончании ввода данных по ним создается пучок волокон и проводится моделирование его разрыва. После выполнения необходимых расчётов выводится кривая разрыва. Под графиком указывается максимальное усилие (Pmax), приложенное к пучку и соответствующее его разрывной нагрузке, и удлинение, а также значения удлинения и усилия, при которых произошел разрыв последнего волокна.

По оси абсцисс диаграммы растяжения откладывается удлинение в процентах, по оси ординат – приложенная нагрузка в сН.

В программе выполняются следующие основные операции: сортировка волокон по возрастанию их разрывного удлинения; расчет приложенного к сечению усилия, при котором произойдет разрыв данного волокна; построение диаграммы растяжения по полученным данным.

Поскольку известны разрывная нагрузка и разрывное удлинение каждого волокна, распределенные в соответствии с выбранным законом, рассчитывается приложенная к каждому из них нагрузка, соответствующая относительному удлинению пучка в данный момент.

Нагрузка, приложенная к пучку, в каждый момент времени равна сумме усилий, приложенных к каждому из неразорвавшихся волокон в его сечении:

$$P = \sum_{i=m+1}^{n} P_i, \qquad (6)$$

где P_i – усилие, приложенное к i-му волокну; m – количество разорвавшихся волокон; n – количество волокон в сечении.

Для получения результата моделирования достаточно рассчитать нагрузку по формуле (6) при каждом удлинении пучка без учета разорвавшихся волокон, то есть тех, разрывное удлинение которых меньше текущего удлинения пучка. Таким образом происходит моделирование

Витебский государственный технологический университет

растяжения и разрыва пучка волокон заданного типа.

Полученная имитационная модель позволяет определить степень влияния вариации между волокнами пучка относительного удлинения и разрывной нагрузки.

В ходе моделирования выявлено, что вариации значений разрывной нагрузки, распределенной по нормальному закону, не оказывают влияния на форму кривой растяжения пучка и суммарную разрывную нагрузку волокон (рисунок 4). При изменении коэффициента вариации по разрывной нагрузке CV_p от 0 до 30 % вариация разрывной нагрузки пучка оказалась незначительной и составила 2,82 %.

Существенное влияние на форму диаграмм растяжения оказывает изменение коэффициента вариации по относительному удлинению. В процессе имитационного моделирования выявлено, что с увеличением коэффициента вариации CV_ε от 0 до 30 % разрывная нагрузка пучка уменьшалась от 516,79 сН до 237,88 сН (вариация составила 25 %). Полученная зависимость представлена графически на рисунке 5.

Кроме вышесказанного, при изменении коэффициента вариации CV_ε изменяется начальный модуль упругости и полное удлинение при разрыве (рисунок 6).

Отмечено, что с увеличением коэффициента вариации по относительному удлинению CV_ε от 0 до 30 % угол наклона касательной к кривой растяжения в начале координат, соответствующий начальному модулю упругости, увеличивается в 1,3 раза, а полное удлинение, соответствующее разрывной нагрузке пучка, уменьшается с 6,2 до 4,4 %.

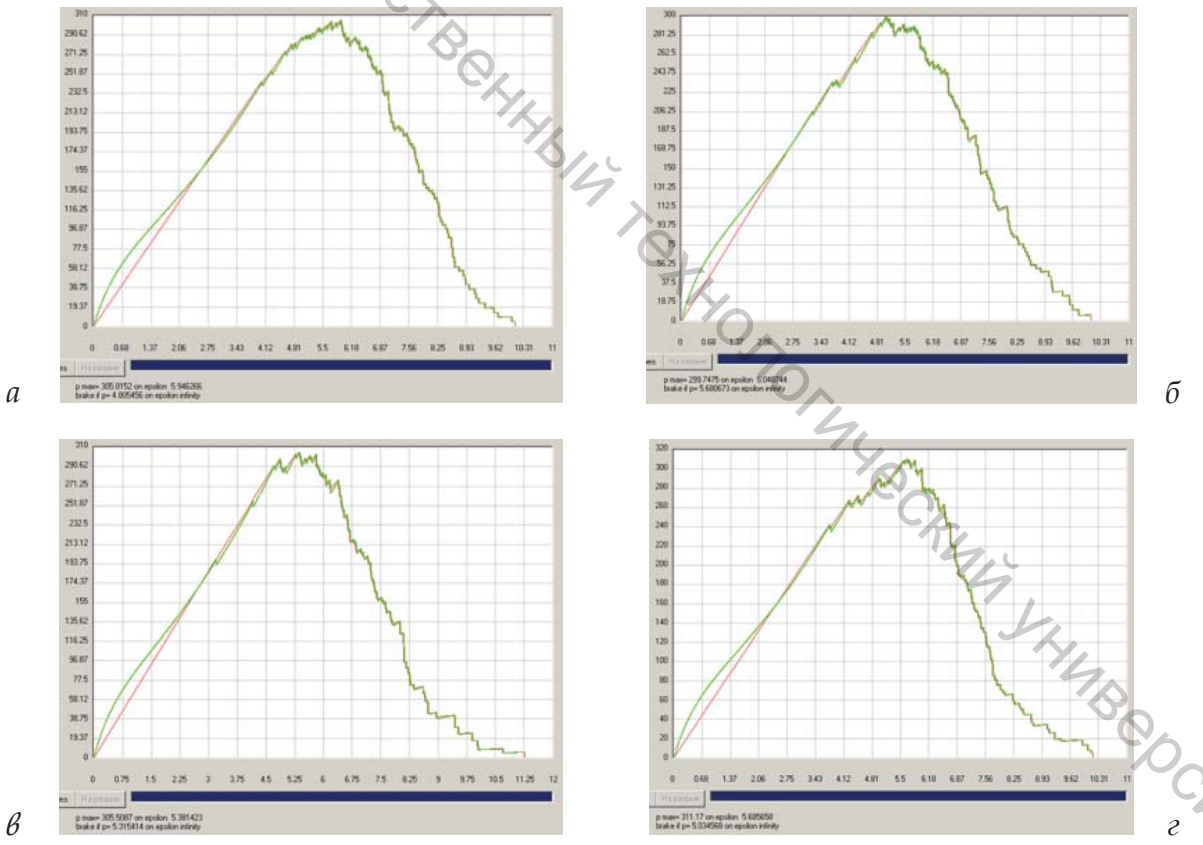


Рисунок 4 – Влияние коэффициента вариации по разрывной нагрузке на вид кривой растяжения пучка хлопковых волокон (математическое ожидание разрывной нагрузки волокна 5,2 сН; математическое ожидание относительного удлинения 7,5 %, коэффициент вариации по удлинению 20 %): а – CV_p = 5 %; б – CV_p = 15 %; в – CV_p = 25 %; г – CV_p = 30 %

Витебский государственный технологический университет

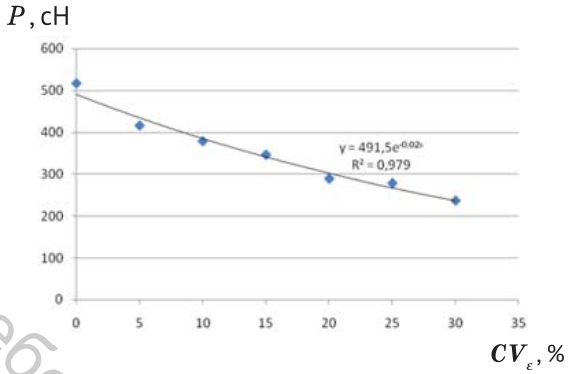
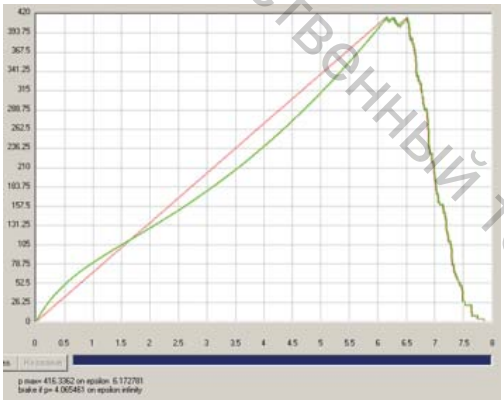


Рисунок 5 – Зависимость разрывной нагрузки пучка хлопковых волокон от коэффициента вариации по относительному удлинению (математическое ожидание разрывной нагрузки волокна 5,2 сН; математическое ожидание относительного удлинения 7,5 %)

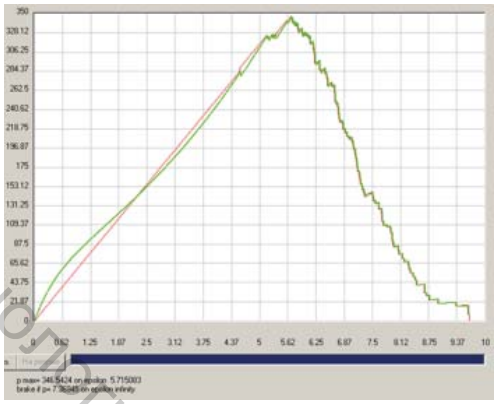
ВЫВОДЫ

1. Разработана модель процесса растяжения волокон различных типов (хлопкового, вискозного, льняного, полиэфирного) с построением диаграмм растяжения. При помощи прикладного пакета Curve Fitting Toolbox определены параметры универсальной математической модели. Полученные зависимости необходимы для повышения точности имитационного моделирования деформирования пучка волокон.

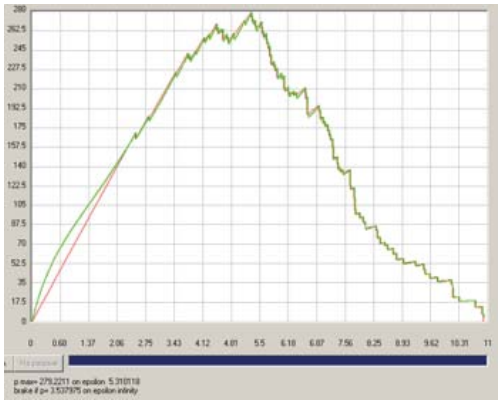
2. Получена имитационная модель процесса растяжения и разрыва пучка волокон на основе данных о растяжении единичных волокон. Проведено исследование влияния вариации между волокнами пучка разрывной нагрузки и разрывного удлинения. Установлено, что существенное влияние на форму диаграмм растяжения оказывает коэффициент вариации



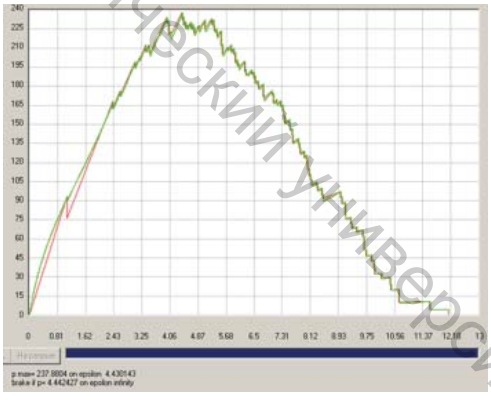
а



б



в



г

Рисунок 6 – Влияние коэффициента вариации по относительному удлинению на вид кривой растяжения пучка хлопковых волокон (математическое ожидание разрывной нагрузки волокна 5,2 сН, коэффициент вариации 20 %, математическое ожидание относительного удлинения 7,5 %:
а – CV_ε = 5 %; б – CV_ε = 15 %; в – CV_ε = 25 %; г – CV_ε = 30 %

Витебский государственный технологический университет

по относительному удлинению, с увеличением которого от 0 до 30 % разрывная нагрузка пучка хлопковых волокон уменьшается от 516,79 сН до 237,88 сН, полное удлинение уменьшается с 6,2 до 4,4 % и возрастает начальный модуль упругости.

3. Полученная модель может быть использована при дальнейшем проведении работ по созданию методики прогнозирования физико-механических свойств пряжи.

Витебский государственный технологический университет

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Рыклин, Д. Б. (2010), *Технология и оборудование для приготовления волокнистого настила*, Витебск, ВГТУ, 239 с.

2. Перепелкин, К. Е., Лебедева, Г.Г. (1968), *Методы исследования свойств волокон и нитей*, Ленинград, 79 с.

3. Давыдов, А.Ф. (1997), *Текстильное материаловедение*, Москва, Российский заочный институт текстильной и легкой промышленности, 168 с.

4. Кузнецов, А.А., Ольшанский В.И. (2004), *Оценка и прогнозирование механических свойств текстильных нитей*, Витебск, ВГТУ, 225 с.

5. Кузнецов, А.А. (2007), Прогнозирование показателей деформационных свойств текстильных нитей по результатам полуциклового испытания на растяжение, *Вестник ВГТУ*, Витебск, 2007, № 12, С. 36-41.

6. Кукин, Г.Н., Соловьев А.Н., Кобляков А.И. (1989), *Текстильное материаловедение (волокна и нити)*, Москва, 352 с.

7. Morton, W.E., Hearle, J.W.S. (2008), Physical properties of textile fibres, England, Cambridge, p 765.

REFERENCES

1. Ryklin, D. B. (2010), *Tehnologija i oborudovanie dlja prigotovlenija voloknistogo nastila* [Technology and equipment for card mat manufacturing], Vitebsk, UO Vitebskij gosudarstvennyj tehnologicheskij universitet - Educational Institution Vitebsk State Technological University, 239 p.

2. Perepelkin, K. E., Lebedeva, G.G. (1968), *Metody issledovanija svojstv volokon i nitej* [Methods of investigating the properties of fibers and yarns], Leningrad, 79 p.

3. Davydov, A.F. (1997), *Tekstil'noe materialovedenie* [Textile materials science], Moscow, Rossijskij zaochnyj institut tekstil'noj i legkoj promyshlennosti - Russian Correspondence Institute of Textile and Light Industry, 168 p.

4. Kuznetsov, A.A., Ol'shanskij V.I. (2004), *Ocenka i prognozirovanie mehanicheskih svojstv tekstil'nyh nitej* [Estimation and prediction of the mechanical properties of textile yarns], Vitebsk, UO Vitebskij gosudarstvennyj tehnologicheskij universitet - Educational Institution Vitebsk State Technological University, 225 p.

5. Kuznetsov, A.A. (2007), Prognozirovanie pokazatelej deformacionnyh svojstv tekstil'nyh nitej po rezul'tatam poluciklovogo ispytanija na rastjazhenie [Forecasting of deformation properties of textile yarns by results of half-

cycle of the tensile test], *Vestnik VGTU* - Bulletin of Vitebsk State Technological University, Vitebsk, 2007, № 12, pp. 36-41.

6. Kukin, G.N., Solov'ev A.N., Kobljakov A.I. (1989), *Tekstil'noe materialovedenie (volokna i niti)* [Textile materials science (fibers and yarns)], Moscow, 352 p.

7. Morton, W.E., Hearle, J.W.S. (2008), Physical properties of textile fibres, England, Cambridge, 765 p.

Витебский государственный технологический университет

Статья поступила в редакцию 13. 10. 2014 г.