

## РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ГРЕБНЕЧЕСАНИЯ

Д.Б. Рыклин, О.М. Катович

УДК 677.21.021.186+677.21.051.186

### РЕФЕРАТ

*ГРЕБНЕЧЕСАНИЕ, ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ, НЕРОВНОТА, РАССОРТИРОВКА, ОТДЕЛЕНИЕ, ВОЛОКНИСТЫЙ ПРОДУКТ*

*Цель работы – создание компьютерной программы, позволяющей определять и оптимизировать параметры работы гребнечесального оборудования, а также прогнозировать комплексные результаты переработки полуфабрикатов прядильного производства.*

*На основании анализа работы гребнечесальной машины разработана имитационная модель процесса гребнечесания, учитывающая случайный характер процессов и свойств волокнистого продукта.*

*В процессе моделирования с использованием компьютерной программы, которая создана на основе разработанной модели, установлено, что учет возможности обрыва и проскальзывания волокон при воздействии на них рабочих органов гребнечесальных машин позволяет существенно приблизить получаемые результаты к данным о фактической рассортировке волокон.*

*В результате моделирования процесса гребнечесания получена имитационная модель рассортировки, отделения и спайки, учитывающая случайный характер процессов и свойств волокнистого продукта, и компьютерная программа на ее основе.*

*В производственных условиях доказана достоверность разработанной модели и подтверждена возможность ее использования для оптимизации технологического процесса гребнечесания при условии экспериментального определения значений коэффициентов модели.*

В последние годы на текстильных прядильных предприятиях Республики Беларусь осуществляется широкомасштабная модернизация с установкой современного технологического оборудования, в связи с чем возникает необходимость детального исследования процессов производства пряжи и полотен.

### ABSTRACT

*COMBING, SIMULATION MODEL, UNEVENNESS, FIBRES LENGTH DISTRIBUTION, SLIVER*

*The simulation computer program that allows defining and optimizing the working setting parameters of combing machines for cotton processing is developed. The algorithm of the program does not depend on the kind of processed fibers and the type of combing machine. By simulating the following parameters are taken into account: fiber length and linear density, irregularity of these parameters, working settings of combing machine. The program allows to consider the possibility of breakage and slippage of fibers during combing process for compliance with the results of simulation to the actual of fibers length distribution. The adequacy of developed model is proved on the basis of analysis of the experimental results that were obtained in spinning mill.*

Одним из наиболее сложных процессов прядильного производства, оказывающим значительное влияние на качественные показатели выпускаемой продукции, является процесс гребнечесания. С учетом технологических особенностей современных гребнечесальных машин и часто изменяющегося ассортимента

выпускаемой пряжи актуальной задачей является определение влияния свойств перерабатываемого сырья на рациональные значения параметров процесса гребнечесания. Однако проведение экспериментальных исследований в реальных производственных условиях в ряде случаев затруднено в связи с загруженностью оборудования и ускоренным износом отдельных регулировочных деталей при частой переналадке машин.

Одним из способов сокращения объема экспериментальных исследований является разработка математических моделей, описывающих технологические процессы. Разработке математической модели процесса гребнечесания посвящены теоретические работы отечественных и зарубежных ученых, таких как Н.А. Васильев [1], А.Г. Севостьянов [2], А.Н. Ванчиков [3], Л.Т. Музылев [4], Е.И. Битус [5], S.W. Lee [6], Lord E. [7], Belin R.E. [8], Shapiro H.N. [9], Byatt W.J. [10], Lynch L.C. [11], Tallan J.D. [12] и др. Полученные ими модели отличаются степенью сложности, количеством применяемых допущений, используемым математическим аппаратом. В большинстве случаев они применяются для определения влияния величины питания и разводки на производительность машины, выход гребенного очеса и качество прочеса.

Согласно теории гребнечесания все волокна холстика в зависимости от их длины могут быть разделены на 3 группы: прочес, очес и волокна неточно сортируемой группы [13].

Однако экспериментально установлено, что распределение волокон прочеса по длине, получаемое на основании применения известных теоретических формул [13], значительно отличается от фактического распределения при сохранении общих закономерностей процесса рассортировки.

Среди причин этого несоответствия главными являются следующие:

- обрыв передних кончиков волокон, зажатых в тисках, иглами (или зубьями) гребенного барабанчика;
- обрыв задних кончиков волокон, отделяемых в прочес, при их протаскивании между иглами верхнего гребня;
- проскальзывание длинных волокон в тисочном зажиме и попадание их в очес.

Анализируя существующие модели, можно сделать вывод, что на сегодня недостаточно подробно изучено влияние процессов разрыва и проскальзывания волокон в процессе гребнечесания на результаты рассортировки волокон по классам длины. Это приводит к тому, что фактическая диаграмма рассортировки существенно отличается от теоретически получаемых данных. Кроме того, большинство моделей характеризуются локальным характером описания процессов, протекающих на гребнечесальной машине, то есть некоторые модели позволяют исследовать процесс гребнечесания с точки зрения рассортировки волокон, а другие – с точки зрения формирования прочеса.

В связи с этим целью данной работы было создание имитационной модели позволяющей определять и оптимизировать параметры работы гребнечесального оборудования, а также прогнозировать комплексные результаты переработки полуфабрикатов прядильного производства.

Разработка предлагаемой имитационной модели процессов, осуществляемых на гребнечесальных машинах, основывалась на модификации классических подходов к моделированию волокнистых продуктов, рассортировки волокон по длинам в процессе гребнечесания и спайки отделенных порций.

Первым этапом моделирования являлось получение массива данных о волокнах, составляющих питающий холстик и подвергающихся гребнечесанию. С учетом ограниченных возможностей современных компьютеров было принято решение о моделировании не холстика в целом, а одной из лент, входящих в его состав, и распространении результатов моделирования на остальные ленты холстика.

В качестве математического аппарата для моделирования волокнистого продукта была использована так называемая модель “идеальной” или “случайной” ленты (модель Martindale). Эта модель является единственным теоретическим представлением, дающим количественную информацию, широко используемую на практике.

Волокнистый продукт представляется в виде пуассоновского потока, то есть считается, что вероятность появления ровно  $n$  передних (или задних) концов волокон в интервале  $(t, t + \tau)$  находится по следующей формуле:

$$p_n = \frac{(\lambda\tau)^n e^{-\lambda\tau}}{n!}, \quad (1)$$

где  $\lambda$  – параметр потока волокон, равный математическому ожиданию числа передних концов волокон в единицу времени (или на единицу длины продукта), то есть интенсивность потока.

При моделировании принималось, что длина и линейная плотность волокна являются случайными величинами, характеризующимися нормальным законом распределения с заданными параметрами.

Однако стационарная модель потока в ряде случаев не позволяет получить результаты, которые соответствуют практическим результатам. Основной причиной несовпадения результатов является тот факт, что рандомизированная модель не учитывает преобразование продукта в процессах вытягивания и сложения. В то же время известно, что в процессе вытягивания биение цилиндров, движение неконтролируемых волокон и ряд других явлений становятся причинами появления периодических составляющих неровноты. В связи с этим в разработанной модели предусмотрена возможность исследования процесса гребнечесания волокнистых продуктов, характеризующихся комбинированной неровнотой, включающей случайную и периодическую составляющую. В этом случае интенсивность потока  $\lambda$  описывалась периодической функцией координаты исследуемого сечения, то есть расстояния от данного сечения до начала моделируемого продукта [14].

Согласно разработанному алгоритму, моделирование волокнистого продукта, подвергающегося гребнечесанию, осуществляется следующим образом:

1. По закону Пуассона с учетом заданного закона изменения интенсивности потока генерируется количество концов волокон на каждом рассматриваемом участке продукта.
2. Для каждого волокна, передний конец которого приходится на рассматриваемый участок, генерируются длина и линейная плотность как случайные величины, распределенные по нормальному закону распределения с заданными характеристиками: математическим ожиданием и коэффициентом вариации.
3. С учетом координаты начала волокна и его

длины осуществляется добавление его линейной плотности к линейной плотности продукта на всех соответствующих его участках.

Таким образом, получаемый массив заполняется следующей информацией для каждого волокна продукта (холстика): длина, линейная плотность, координата переднего конца (расстояние от начала холстика до начала волокна).

На следующем этапе осуществляется моделирование процесса рассортировки с использованием расчетной схемы, представленной на рисунке 1, на который введем следующие обозначения координат концов волокна:

$X$  – расстояние от конца бородачки до переднего конца волокна, мм;

$Z$  – расстояние от заднего конца волокна до тисочного зажима  $T-T$ , измеренное вдоль волокна, мм.

Расстояние от заднего конца волокна до тисочного зажима с учетом принятых обозначений рассчитывается по формуле

$$Z = l_B + X - L_B, \quad (2)$$

где  $X$  – расстояние от конца бородачки до переднего конца волокна, мм;  $Z$  – расстояние от заднего конца волокна до тисочного зажима  $T-T$ , измеренное вдоль волокна, мм;  $l_B$  – длина исследуемого волокна, мм;  $L_B$  – длина бородачки, прочесываемой гребненным барабанчиком, мм.

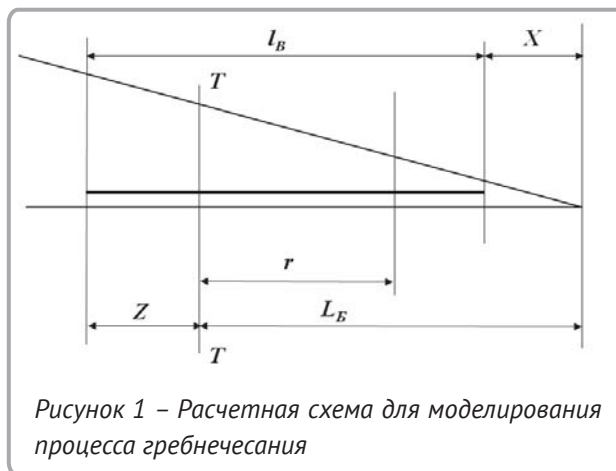


Рисунок 1 – Расчетная схема для моделирования процесса гребнечесания

Данные координаты уменьшаются в каждом следующем цикле на длину питания за счет подачи холстика вперед питающими цилиндрами. Если величина  $X$  меньше длины питания  $F$ , то в данном цикле волокно отделяется в прочес, и

его передний конец располагается на расстоянии  $XE_0$  от начала отделенной порции, где  $E_0$  – вытяжка в процессе отделения.

Для учета указанных недостатков традиционных моделей процесса гребнечесания в разрабатываемую математическую модель были внесены корректировки.

Учен тот факт, что волокна, прочесываемые гребенным барабанчиком, могут проскальзывать в тисочном зажиме. Однако принято допущение о том, что проскальзывание волокон может учитываться только в случае, когда длина участка волокна, зажатого в тисочном зажиме, меньше 5 мм. При этом вероятность проскальзывания повышается с уменьшением длины данного участка.

Допустим, что для волокна, координата  $Z$  которого больше либо равна 5 мм, вероятность проскальзывания в зажиме равна 0, то есть проскальзывание невозможно из-за надежного зажима волокна. Если величина  $Z$  меньше 5 мм (зажим ненадежный), для расчета вероятности проскальзывания будем использовать формулу

$$P_{II} = \overline{P_{II}} \frac{l_B - r - Z}{\overline{l_B} - r} \left( 1 - \frac{Z}{5} \right), \quad (3)$$

где  $\overline{P_{II}}$  – средняя вероятность проскальзывания волокна, задний конец которого совпадает с тисочным зажимом;  $l_B$  – длина исследуемого волокна, мм;  $\overline{l_B}$  – средняя длина волокна, мм;  $r$  – длина участка бородки, непрочесываемого гребенным барабанчиком в рассматриваемом цикле, называемого «мертвым пространством», мм.

При определении вероятности разрыва волокна в процессе чесания гребенным барабанчиком учитываются следующие факторы:

- обрыв волокна становится более вероятным с увеличением его участка, прочесываемого гребенным сегментом;
- вероятность разрыва повышается при снижении коэффициента зрелости волокна. Косвенной характеристикой зрелости можно считать линейную плотность волокна.

В связи с этим вероятность разрыва волокна при чесании гребенным барабанчиком определяется по формуле

$$P_{PB} = \overline{P_{PB}} \frac{L_B - r - X}{L_B - r} \cdot \frac{\overline{T_B}}{T_B}, \quad (4)$$

где  $\overline{P_{PB}}$  – средняя вероятность разрыва волокна, передний конец которого совпадает с концом бородки;  $T_B$  – линейная плотность волокна, текс;  $\overline{T_B}$  – средняя линейная плотность волокна, текс.

Координата начала каждого из моделируемых волокон  $X$  для расчета разрыва и проскальзывания определяется как

$$X = X_0 - F \cdot (n - 1), \quad (5)$$

где  $X_0$  – расстояние от начала холстика (в первом моделируемом цикле) до переднего конца моделируемого волокна;  $n$  – номер цикла от начала процесса моделирования;  $F$  – длина питания за один цикл, мм.

В тех случаях, когда выполняется условие  $X > L_B - r$ , волокно не рвется и не проскальзывает, так как в данном цикле не прочесывается гребенным барабанчиком.

Если в результате моделирования установлено, что волокон обрывается в результате воздействия гребенного барабанчика, координата разрыва определяется как случайная величина, равномерно распределенная в пределах «мертвого пространства». В результате обрыва волокно разделяется на две части, первая из которых попадает в очес в данном цикле, а вторая остается зажатой в тисках. С учетом длины второй части волокна и ее расположением относительно тисков в последующие циклы моделирования определяется последующая возможность попадания в очес или прочес. То есть в следующих циклах моделирования оставшаяся часть волокна рассматривается как отдельное волокно меньшей длины.

Вероятность разрыва волокон при чесании верхним гребнем определяется как

$$P_{PG} = \overline{P_{PG}} \cdot \frac{\overline{T_B}}{T_B}, \quad (6)$$

где  $\overline{P_{PG}}$  – средняя вероятность разрыва волокна при чесании верхним гребнем.

В формуле (6), так же как и в формуле (4), принято допущение о том, что вероятность обрыва снижается с увеличением коэффициента зрелости волокна, косвенно учитываемого через его линейную плотность. Координата точки разрыва волокна определяется как случайная величина, равномерно распределенная на всей длине волокна. Это связано с тем, что обрыв может произойти на участке от верхнего гребня до заднего отделительного зажима, через который проходят все рассматриваемые участки волокна.

В результате разрыва волокно разделяется на две части, первая из которых обязательно попадает в прочес, а вторая – в очес.

Кроме рассортировки необходимо осуществлять моделирование процесса спайки, то есть формирования ватки прочеса из отделенных порций.

Допустим, что передний конец рассматриваемого волокна находится на расстоянии  $X$  от конца бородки. После отделения, если данное волокно попадает в прочес, его передний конец оказывается на расстоянии, рассчитываемом по формуле

$$X_{II} = X \cdot E_0, \quad (7)$$

где  $E_0$  – вытяжка порции в процессе отделения.

Так как вытяжку при отделении невозможно измерить непосредственно на гребнечесальной машине, ее необходимо рассчитывать по формуле

$$E_0 = \frac{\Delta}{F}, \quad (8)$$

где  $\Delta$  – перемещение прочеса вперед в процессе отделения, мм;  $F$  – длина питания за один цикл, мм.

Если передний конец волокна располагается на расстоянии от  $X_0$  от начала холстика, то его задний конец располагается на расстоянии  $(X_0 + l_B)$ . Данное волокно будет отделяться в прочес в цикле, когда выполняется условие

$$X + l_B < L_B. \quad (9)$$

С учетом условия (9) цикл, в котором волокно переходит из холстика в отделенную порцию,

можно рассчитать как целую часть числа:

$$N = \frac{(X_0 - R - A + \alpha F + l_B)}{F + 1}, \quad (10)$$

где  $R$  – разводка, то есть минимальное расстояние между нижней губкой тисков и задним зажимом отделительного прибора, мм;  $A$  – расстояние, на которое тиски смещаются к отделительному прибору в течение процесса отделения, мм;  $\alpha$  – момент питания, то есть доля длины питания, на которое питающие цилиндры подают холстик вперед до начала процесса отделения.

Рассматриваемое волокно будет находиться от начала прочеса на расстоянии

$$X_{III} = (N - 1) \cdot L_3 + X \cdot E_0, \quad (11)$$

где  $L_3$  – длина эффективной подачи прочеса за цикл, мм.

На основе приведенных формул разработан алгоритм моделирования, то есть имитационная модель процесса гребнечесания, которая легла в основу компьютерной программы. Программа написана на языке Java с учетом формул, приведенных выше.

Работа программы включает следующие этапы:

- моделирование отрезка холстика определенной длины и линейной плотности, состоящего из волокон, параметры которых являются случайными величинами, распределенными по заданным законам;
- моделирование процессов гребнечесания, отделения и спайки порций с учетом введенных параметров работы машины;
- оптимизация параметров работы гребнечесальной машины в пределах заданного диапазона изменения технологических режимов (при необходимости).

На основании приведенных формул и допущений программа позволяет получать распределение волокон по длине в холстике, порции, прочесе, очесе, а также градиент неровноты холстика и прочеса по линейной плотности, определять выход гребенного очеса.

Рассмотрим результаты моделирования процесса гребнечесания при следующих характери-

стиках волокон холстика и параметрах процесса гребнечесания:

- средняя длина волокна – 26 мм;
- коэффициент вариации по длине волокна – 30 %;
- средняя линейная плотность волокна – 0,183 текс;
- коэффициент вариации по линейной плотности волокна – 35 %;

- длина питания – 5,2 мм;
- разводка между нижней губкой тисков и задним отделительным зажимом – 21,5 мм.

При моделировании принято, что холстик характеризуется случайной неровнотой, то есть периодическая составляющая неровноты отсутствует. Результаты моделирования рассортировки волокон в процессе гребнечесания представлены в таблице 1.

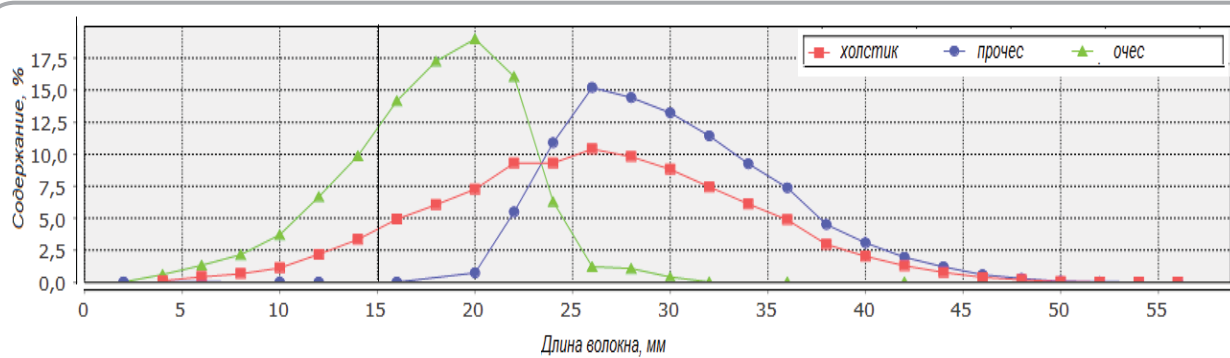


Рисунок 2 – Диаграммы распределения волокон в холстике, очесе и прочесе по классам длины

Таблица 1 – Данные о рассортировке волокон в процессе гребнечесания, полученные с помощью программы моделирования

Наименование показателя	Значение показателя			
	Для холстика	Без учета разрыва и проскальзывания	С учетом разрыва волокон	С учетом разрыва и проскальзывания волокон
Штапельная длина волокон в прочесе, мм	35,5	35,5	35,5	35,5
Модальная длина волокон в прочесе, мм	26,0	26,0	26,0	26,0
Содержание коротких волокон в очесе (по массе), %	-	50,5	53,19	48,4
Содержание коротких волокон в прочесе (по массе), %	-	0	0,045	0,032
Содержание коротких волокон в очесе (по количеству), %	-	67,07	68,44	65,83
Содержание коротких волокон в прочесе (по количеству), %	-	0	0,123	0,125
Средняя линейная плотность волокон в холстике, мтекс	183	-	-	-
Средняя линейная плотность волокон в прочесе, текс	-	226	226	226
Средняя линейная плотность волокон в очесе, текс	-	122	128	130
Коэффициент вариации по длине волокон в прочесе, %	25,5	19,3	19,4	19,4
Выход гребенных очесов, %	-	13,78	15,27	16,07
Доля (по массе) разорванных волокон при чесании гребенным барабанчиком, %	-	-	1,284	1,021
Доля (по массе) разорванных волокон при чесании верхним гребнем, %	-	-	0,111	0,101
Количество длинных волокон, выделившихся в очес из-за проскальзывания в тисочном зажиме, %	-	-	-	2,06

Анализируя данные таблицы 1 и рисунка 2, можно отметить, что возможность проскальзывания волокон в тисочном зажиме приводит к увеличению выхода гребенных очесов с 13,78 % до 16,07 %. Также можно по представленным диаграммам отметить наличие длинных волокон в очесе и коротких волокон в прочесе, что соответствует реальным условиям процесса гребнечесания.

Адекватность разработанной имитационной модели можно показать, сопоставляя полученные данные с результатами экспериментальных исследований, проведенных при исходных условиях, которые были приняты при моделировании. Оценка качества полуфабрикатов и гребенного очеса проведена с использованием прибора AFIS PRO2 фирмы Uster Technologies AG (Швейцария). Результаты испытания полуфабрикатов и гребенного очеса приведены в таблице 2.

Сопоставляя данные, представленные в таблицах 1 и 2, можно отметить следующее:

- отклонение расчетного значения штапельной длины волокон прочеса от фактического значения составляет 0,9 мм или 2,6 %;
- расчетный выход гребенного очеса превышает фактическое значение на 0,87 %, то есть в 1,03 раза.

На основании этого можно сделать вывод, что результаты моделирования по указанным показателям хорошо согласуются с опытными данными. Таким образом, установлено, что разработанная модель может быть использована для исследований и оптимизации технологического процесса гребнечесания.

По таким показателям, как линейная плотность волокна и коэффициент вариации по длине волокна в очесе и прочесе, установлены более существенные расхождения расчетных и фактических данных при совпадении основных тенденций. Так, учет влияния линейной плотности волокон в разработанной модели на вероятность их разрыва привел к тому, что средняя линейная плотность волокон очеса существенно снизилась по сравнению со значением данного показателя для холстика со 183 до 130 мтекс. Данная закономерность подтверждается результатами экспериментальных исследований (линейная плотность холстика 183 мтекс, а очеса – 150 мтекс). Для более точного прогнозирова-

ния результатов рассортировки волокон различной степени зрелости на следующем этапе работы модель будет доработана.

Необходимо также отметить, что для получения результатов моделирования, соответствующих фактическим данным, значения вероятности разрыва и проскальзывания волокон должны устанавливаться на основании предварительно получаемых экспериментальных данных. Возможность использования в модели экспериментальных результатов повышает ее гибкость и позволяет учитывать особенности конкретного технологического оборудования, его технического состояния, а также эффективности процессов подготовки волокнистого материала к процессу гребнечесания в реальных производственных условиях.

*Таблица 2 – Результаты испытания полуфабрикатов и гребенного очеса, проведенные с использованием прибора AFIS*

Наименование показателя	Значение показателя		
	для холстика	для прочеса	для очеса
Средняя длина волокна, мм	25,9	26,2	13,8
Коэффициент вариации средней длины, %	32	30,7	53
Штапельная длина волокна, мм	33,8	34,6	20,2
Линейная плотность волокна, мтекс	183	190	150
Коэффициент вариации по длине волокон, %	32	30,7	53
Показатель зрелости волокна	0,97	1,0	0,77
Содержание незрелых волокон, %	4,4	4,1	11,1
Выход очеса, %	-	-	15,2

## ВЫВОДЫ

1. На основании анализа работы гребнечесальной машины разработана имитационная модель рассортировки, отделения и спайки, учитывающая случайный характер процессов и свойств волокнистого продукта.

2. В процессе моделирования с использованием компьютерной программы, которая создана на основе разработанной модели, установлено, что учет возможности обрыва и проскользывания волокон при воздействии на них рабочих органов гребнечесальных машин поз-

воляет существенно приблизить получаемые результаты к данным о фактической рассортировке волокон.

3. На основании анализа результатов экспериментального исследования в производственных условиях доказана достоверность разработанной модели и подтверждена возможность ее использования для оптимизации технологического процесса гребнечесания при условии экспериментального определения значений коэффициентов модели.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Васильев, Н. А. Механическая технология волокнистых веществ. Харьков, 1902. 688 с.
2. Севостьянов, А. Г. Методы и средства исследования механико-технологических процессов текстильной промышленности. – Москва: Легкая индустрия, 1980. 392 с.
3. Ванчиков, А. Н. Анализ технологического процесса на гребнечесальных машинах разных конструкций. Москва, 1941. 688 с.
4. Музылев, Л. Т., Яковлев, И. К. Усовершенствование процесса гребнечесания шерсти. Москва : Легкая индустрия, 1970. 196 с.
5. Битус, Е. И. Моделирование рассортировки волокон шерсти по длине при гребнечесании с учетом их разрыва. Изв. вузов. Технология текстильной промышленности, 2002, №6, 28-32 с.
6. Lee, S. W. A probability model for random fibre breakages. Textile research journal. - P. I. 1967. - Vol. 37, № 10. - P. 860-879.
7. Lord, E. Some observations on fibre breakage in the ginning of cotton. Journal of the Textile Institute. - 1963. - Vol. 54, № 2. - P. 69-73.
8. Belin, R. E. Directional effects in worsted rectilinear combing. Journal of the Textile Institute. - 1967. - Vol. 58, № 4. - P. 31-35.
9. Shapiro, H. N. Mathematical aspects of cotton fibre length distribution under various breakage models. Textile research journal. - 1964. - Vol. 34, № 4. - P. 303-307.
10. Byatt, W. J. Changes in the weight distribution of fibre length of cotton as a result of random fibre breakage. Textile research journal. - 1958. - Vol. 58, № 5. - P. 415-421.
11. Lynch, L. C. An instrument for rapid automatic measurement of fibre fineness distribution. Textile research journal. - 1976. - Vol. 46. - P. 633-660.
12. Tallant, J. D. Breakage model and measuring technique for fibre length distribution. Textile re-search journal. - 1968. - Vol. 38, № 3. - P. 149-155.
13. Рыклин, Д. Б. Технология и оборудование для производства волокнистой ленты; УО «ВГТУ». - 2008. Витебск: УО «ВГТУ», 268 с.
14. Рыклин, Д. Б. Моделирование технологических процессов переработки неоднородных волокнистых смесей. Витебск : УО «ВГТУ», 2006. 170 с.



## REFERENCES

1. Vasiliev, N.A. (1902). Mechanical technology of fibrous materials. [Mehanicheskaja tehnologija voloknistyh veshhestv ] Kharkov, 688 p.
2. Sevostianov, A.G. (1980). Methods and tools for the research of mechanics and technological processes of textile industry: a textbook for high schools [Metody i sredstva issledovanija mehaniko-tehnologicheskikh processov tekstil'noj promyshlennosti ] Moscow: Light industry [Legkaja industrija], 392 p.
3. Vanchikov, A.N. (1941). Analysis of the process on combing machines of different designs [Analiz tehnologicheskogo processa na grebnechesal'nyh mashinah raznyh konstrukcij] - Moscow. 688 p.
4. Muzylev, L.T, Yakovlev, I.K. (1970). The improving of wool combing. [Uovershenstvovanie processa grebnechesanija shersti ] Moscow: Light Industry [Legkaja industrija], 196 p.
5. Bitus, E. I. (2002). Simulation of the sorting of wool fibres during combing taking into account their breakage. [Modelirovanie rassortirovki volokon shersti po dline pri grebnechesanii s uchetom ih razryva]. Math. universities. Technology of Textile Industry [Izv. vuzov. Tehnologija tekstil'noj promyshlennosti]. (6), pp. 28-32.
6. Lee, S.W. (1967). A probability model for random fibre breakages. Textile research journal. P. I. - Vol. 37, (10), pp. 860-879.
7. Lord, E. (1963). Some observations on fibre breakage in the ginning of cotton. Journal of the Textile Institute. -Vol. 54, (2), pp. 69-73.
8. Belin, R.E., Taylor D.S. (1967). Directional effects in worsted rectilinear combing. Journal of the Textile Institute. - Vol. 58, (4), pp. 31-35.
9. Shapiro, H.N., Spare G. (1964). Mathematical aspects of cotton fibre length distribution under various breakage models. Textile research journal. -Vol. 34, (4), pp. 303-307.
10. Byatt, W.J., Elting J.H. (1958). Changes in the weight distribution of fibre length of cotton as a result of random fibre breakage. Textile research journal. - Vol. 58, (5), pp. 415-421.
11. Lynch, L.C., Michie H.A. (1976). An instrument for rapid automatic measurement of fibre fineness distribution. Textile research journal. -Vol. 46. pp. 633-660.
12. Tallant, J.D. (1968). Breakage model and measuring technique for fibre length distribution. Textile research journal. - Vol. 38, (3). pp. 149-155.
13. Ryklin, D.B. (2008). Technology and equipment for fibrous sliver manufacturing [Tehnologija i oborudovanie dlja proizvodstva voloknistoj lenty]; Vitebsk: VSTU [Vitebskij gosudarstvennyj tehnologicheskij universitet], 268 p.
14. Ryklin, D.B. (2006) Modeling of technologies of fiber blend processes [Modelirovanie tehnologicheskikh processov pererabotki neodnorodnyh voloknistyh smesej]: monograph Vitebsk: VSTU, [Vitebskij gosudarstvennyj tehnologicheskij universitet], 170 p.

*Статья поступила в редакцию 09.09.2013 г.*